

SVEU ILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivan Juri**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Ivica Garaši , dipl. ing.

Student:

Ivan Juri

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Prije svega, veliku zahvalnost dugujem mentoru doc. dr. sc. Ivici Garaši u na brojnim i, nadasve, korisnim savjetima te velikoj podršci tijekom izrade rada kao i asistentici dr. sc. Tanji Tomić. Hvala zaposlenicima Laboratorija za zavarivanje, Matiji Šok i u, a posebno Zdenku Batini u koji su omogućili ili pripremu ispitnih uzoraka. U provedbi ispitivanja i pripreme uzoraka na Fakultetu strojarstva i brodogradnje su pripomogli i tehnički suradnici Dubravka Ulaga, Ivan Vovk, Tomislav Kezele, Damir Švec te stručni suradnik Matija Sakoman, mag. ing. Svima se najiskrenije zahvaljujem.

Osobita zahvalnost pripada gospodinu Darku Vranješiću, ing. stroj. iz poduzeća Zagrebački holding d.o.o. – podružnica ZET, odjel Održavanje tramvajske infrastrukture te drugim zaposlenicima koji su dali svoj doprinos prilikom izvođenja eksperimentalnog rada, a posebno Dubravku Horvatu, Slavenu Rimcu, Andriji Kraljiću i suradnici Mariji Meštroviću.

Hvala zaposlenicima poduzeća Monter – strojarske montaže d.d. koji su omogućili ili rezanje uzoraka, a posebno gospodinu Darku Grbavcu, dipl. ing.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, Marijani i Stjepanu, te drugim članovima obitelji na beskrajnoj podršci i neiscrpnjivosti motivaciji tijekom izrade ovog rada, ali i cijelom školovanju. Hvala Zrinki Jurić na lekturi ovoga rada.

Naposljetku, veliko hvala mojoj djevojci Ivani kojoj posvećujem ovaj rad.

Ivan Jurić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN JURIĆ**

Mat. br.: **0035173421**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ZAVARIVANJE TRAMVAJSKIH TRAČNICA SAMOZAŠTIĆUJUĆOM PRAŠKOM PUNJENOM ŽICOM**  
Naslov rada na engleskom jeziku: **WELDING OF TRAM RAILS WITH SELFSHIELDED FLUX CORED WIRE**  
Opis zadatka:

Analizirati vrste i zavarljivost čelika koji se primjenjuju za izradu tramvajskih tračnica. Opisati moguće postupke zavarivanja te posebno proučiti primjenu elektrolučnog zavarivanja samozaštićujućom praškom punjenom žicom. Dati pregled zavarenih spojeva i eksploatacijskih opterećenja u realnim uvjetima i odrediti osnovne probleme koji mogu nastati zbog primjene neodgovarajuće tehnologije zavarivanja. Navesti primjere korištenja navedene tehnologije u realnim uvjetima.

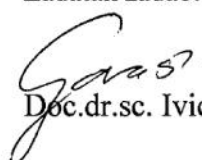
U eksperimentalnom dijelu potrebno je snimiti primjenjenu tehnologiju zavarivanja tramvajskih tračnica praškom punjenom žicom te propisati opseg nerazornih i razornih ispitivanja zavarenog spoja. Za usporedbu, predložiti alternativnu varijantu npr. u smislu smanjenja vremena zavarivanja, zavariti uzorak bez primjene ili sa minimalnim predgrijavanjem. Na zavarenim uzorcima ispitati mehanička svojstva u svim zonama spoja (stopa, vrat i kruna tračnice) te mjerenjem tvrdoće ustanoviti promjene u mikrostrukturi. Zaključno dati preporuke za unaprijeđenje tehnologije zavarivanja samozaštićujućom praškom punjenom žicom u realnim uvjetima.

Zadatak zadan:  
7. svibnja 2015.

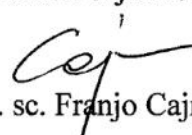
Rok predaje rada:  
9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:  
15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. PREGLED TRAMVAJSKE TRAMVAYE I NJIHOVIH ZNAČAJKI.....	1
2.1. Povijesni razvoj .....	2
2.2. Oblici tramvaya.....	3
2.3. Materijal tramvaya.....	5
2.3.1. Perlitni elici .....	6
2.3.2. Bainitni elici .....	8
2.4. Oštećenje tramvaya.....	9
3. ZAVARIVANJE TRAMVAYE.....	12
3.1. Zavarljivost tramvajskih elika .....	12
3.2. Zavarivanje iskrenjem .....	14
3.3. Aluminotermijsko zavarivanje .....	17
3.4. Zavarivanje samozaštitnom praškom punjenom žicom.....	18
3.5. Ručno elektrolučno zavarivanje .....	20
4. OSVRT NA TRAMVAJSKE TRAMVAYE U SUSTAVU ZET-a.....	21
4.1. Tehnologija zavarivanja .....	22
4.1.1. Zavarivanje tramvaya ručnim elektrolučnim postupkom.....	22
4.1.2. Zavarivanje tramvaya samozaštitnom praškom punjenom žicom.....	23
5. EKSPERIMENTALNI RAD .....	30
5.1. Izrada uzoraka.....	30
5.1.1. Izrada uzorka 1 .....	31

5.1.2.	Izrada uzorka 2 .....	31
5.1.3.	Izrada uzorka 3 .....	31
5.1.4.	Izrada uzorka 4 .....	32
5.1.5.	Izrada uzorka 5 .....	32
5.1.6.	Izrada uzorka 6 .....	32
5.1.7.	Izrada uzorka 7 .....	32
5.2.	Nerazorna ispitivanja .....	32
5.2.1.	Vizualna kontrola .....	33
5.2.2.	Ultrazvu no ispitivanje .....	48
5.2.3.	Radiografsko ispitivanje.....	53
5.2.4.	Analiza rezultata nerazornih ispitivanja .....	58
5.3.	Razorna ispitivanja .....	58
5.3.1.	Priprema makroizbrusaka i epruveta.....	59
5.3.2.	Ispitivanje makrostrukture.....	61
5.3.3.	Mjerenje tvrdo e .....	65
5.3.4.	Stati ki vla ni pokus .....	69
6.	ZAKLJU AK .....	73
	LITERATURA.....	74

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Poprečni presjek tračnice [5].....	1
Slika 2.2. Oblici tračnica [1] .....	3
Slika 2.3. Vrste tračnica [7].....	4
Slika 2.4. Dimenzije žljebaste tračnice profila 60R1 [8] .....	4
Slika 2.5. Vertikalna raspodjela tvrdoće po presjeku glave za dva različita materijala [2] .....	7
Slika 2.6. Usporedba vrstoće i mikrostrukture perlitnog i bainitnog čelika [2] .....	9
Slika 2.7. Promjena oblika tračnice i kotača uslijed trošenja [12] .....	10
Slika 2.8. Plastičnost čelika na glavi tračnice [12].....	11
Slika 3.1. Krivulja promjene temperature u ovisnosti o temperaturi predgrijavanja [9] .....	13
Slika 3.2. TTT dijagram s ucrtanim krivuljama hlađenja [9].....	14
Slika 3.3. Zavarivanje tračnica iskrenjem [9] .....	15
Slika 3.4. Promjena parametara procesa zavarivanja iskrenjem u ovisnosti o vremenu [9] .....	16
Slika 3.5. Zavarivanje tračnica aluminotermijskim postupkom [9] .....	17
Slika 3.6. Shematski prikaz procesa zavarivanja FCAW-S postupkom [15].....	19
Slika 3.7. Zavarivanje žljebaste tračnice REL postupkom uz upotrebu električne ploče [17] .....	20
Slika 4.1. Postavljena specijalna umetna ploča nakon zavarivanja nožice tračnice [20] .....	23
Slika 4.2. Agregat za zavarivanje Ranger 305D [21].....	24
Slika 4.3. Tračnica odrezana ručnim plinskim postupkom .....	25
Slika 4.4. Mjerenje kuta predeformacije tračnica pomoću razvinala .....	25
Slika 4.5. Zavarivanje nožice tračnice .....	26
Slika 4.6. Zavarivanje vrata tračnice uz uporabu bakrenih obloga .....	27
Slika 4.7. Konačni izgled zavara tračnice prije brušenja .....	28
Slika 5.1. Dodatno mehaničko ispitivanje uzoraka.....	48
Slika 5.2. Ultrazvučno ispitivanje uzoraka.....	49
Slika 5.3. Indikacije na uzorku 3.....	50
Slika 5.4. Indikacije na uzorku 4.....	51
Slika 5.5. Indikacije na uzorku 5.....	52
Slika 5.6. Indikacije na uzorku 6.....	53
Slika 5.7. Radiografsko ispitivanje uzoraka.....	54
Slika 5.8. Radiogrami dijelova zavara tračnice uzorka 3 .....	55
Slika 5.9. Radiogrami dijelova zavara tračnice uzorka 4 .....	56
Slika 5.10. Radiogrami dijelova zavara tračnice uzorka 5 .....	56

Slika 5.11. Radiogrami dijelova zavara tra nice uzorka 6 .....	57
Slika 5.12. Zavar u fazi izrade (uzorak 6) s velikom koli inom zaostale troske po rubovima .....	58
Slika 5.13. Rezanje uzoraka automatiziranim plinskim postupkom .....	59
Slika 5.14. Brušenje makroizbrusaka brusnim papirom .....	60
Slika 5.15. Glodanje epruvete za statički vlačni pokus .....	60
Slika 5.16. Makroizbrusak nožice tra nice uzorka 3 .....	61
Slika 5.17. Makroizbrusak nožice tra nice uzorka 5 .....	61
Slika 5.18. Makroizbrusak nožice tra nice uzorka 6 .....	62
Slika 5.19. Makroizbrusak nožice tra nice uzorka 7 .....	62
Slika 5.20. Makroizbrusak vrata tra nice uzorka 3 .....	63
Slika 5.21. Makroizbrusak vrata tra nice uzorka 5 .....	63
Slika 5.22. Makroizbrusak vrata tra nice uzorka 6 .....	64
Slika 5.23. Makroizbrusak glave tra nice uzorka 3 .....	64
Slika 5.24. Makroizbrusak glave tra nice uzorka 5 .....	65
Slika 5.25. Mjerenje tvrdoće .....	66
Slika 5.26. Dijagram vrijednosti tvrdoće po zonama zavara nožice tra nice .....	68
Slika 5.27. Dijagram vrijednosti tvrdoće po zonama zavara vrata tra nice .....	68
Slika 5.28. Dijagram vrijednosti tvrdoće po zonama zavara glave tra nice .....	68
Slika 5.29. Statički vlačni pokus .....	70
Slika 5.30. Dijagrami sila-produljenje dobiveni statičkim vlačnim pokusom .....	71
Slika 5.31. Prijelomne površine epruveta pojedinih uzoraka – krhki lom .....	72



## POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Osnovne karakteristike profila tračnice 60R1 [8] .....	5
Tablica 2.2. Kemijski sastav elika za Vignoleove tračnice [9] .....	6
Tablica 2.3. Kemijski sastav elika za žljebaste tračnice [7] .....	6
Tablica 4.1. Kemijski sastav dodatnog materijala NS 3ME [22] .....	24
Tablica 4.2. Uobičajena mehanička svojstva zavara s dodatnim materijalom NS 3ME [22] .....	24
Tablica 5.1. Plan pokusa i oznake pojedinih uzoraka .....	31
Tablica 5.2. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 1 .....	34
Tablica 5.3. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 2 .....	36
Tablica 5.4. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 3 .....	38
Tablica 5.5. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 4 .....	40
Tablica 5.6. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 5 .....	42
Tablica 5.7. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 6 .....	44
Tablica 5.8. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 7 .....	46
Tablica 5.9. Procjena ocjena pojedinih segmenata zavara .....	47
Tablica 5.10. Oprema i parametri ultrazvučnog ispitivanja .....	49
Tablica 5.11. Pozicija, dimenzije i opis indikacija na uzorku 3 .....	50
Tablica 5.12. Pozicija, dimenzije i opis indikacija na uzorku 4 .....	51
Tablica 5.13. Pozicija, dimenzije i opis indikacija na uzorku 5 .....	52
Tablica 5.14. Pozicija, dimenzije i opis indikacija na uzorku 6 .....	53
Tablica 5.15. Oprema radiografskog ispitivanja .....	54
Tablica 5.16. Parametri radiografskog ispitivanja po dijelovima tračnice .....	54
Tablica 5.17. Izmjerene vrijednosti tvrdoće na makroizbruscima uzorka 3 .....	67
Tablica 5.18. Izmjerene vrijednosti tvrdoće na makroizbruscima uzorka 5 .....	67
Tablica 5.19. Usporedba svojstava osnovnog i dodatnog materijala [17, 22] .....	70
Tablica 5.20. Vrijednosti dobivene statičkim vlačnim pokusom .....	71

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
$I_{xx}$	$\text{cm}^4$	moment tromosti u presjeku x-x
$I_{yy}$	$\text{cm}^4$	moment tromosti u presjeku y-y
$v$	$^{\circ}\text{C/s}$	brzina hlađenja
$T$	$^{\circ}\text{C}$	interval temperature
$t$	s	interval vremena
$R_e$	$\text{N/mm}^2$	granica razvlačenja
$R_m$	$\text{N/mm}^2$	vlačna vrstoća
$R_p$	$\text{N/mm}^2$	prekidna vrstoća
$A$	%	istezanje
$F_m$	kN	maksimalna sila
$F_k$	kN	sila kidanja

## SAŽETAK

U radu su opisane vrste tračnica koje se analiziraju njihova zavarljivost. Dan je pregled najčešćih postupaka zavarivanja tračnica s posebnim naglaskom na zavarivanje samozaštitnom praškom punjenom žicom. Detaljno je opisana tehnologija zavarivanja tračnica u poduzeću Zagrebački holding d.o.o. – podružnica ZET. U eksperimentalnom dijelu rada izrađen je jedan uzorak prema postojećoj tehnologiji zavarivanja u spomenutom poduzeću i nekoliko uzoraka s alternativnim tehnologijama. Na uzorcima su provedena temeljita nerazorna i razorna ispitivanja koja su uključivala vizualnu, ultrazvučnu i radiografsku kontrolu te ispitivanje makrostrukture, mjerenje tvrdoće i statički vlačni pokus. Dobiveni rezultati su analizirani te su dani prijedlozi unaprjeđenja tehnologije.

Ključne riječi: zavarivanje samozaštitnom praškom punjenom žicom, žljebaste tračnice

## **SUMMARY**

The thesis describes the types of rail steels and analyzes their weldability. The most suitable processes for welding rails are dealt with and special attention is given to the Self-Shielded Flux Cored Arc Welding. The technology used for welding rails in Zagreba ki holding d.o.o. – ZET is described in detail. In the experimental part of the thesis, one sample is produced in accordance with the existing technology and several other samples in accordance with alternative technologies. Thorough nondestructive and destructive testing was conducted on the samples. That included the visual, the ultrasonic and the radiographic testing and also the examination of macrostructure, the hardness testing and the tension test. Results are analyzed and suggestions for the improvement of the welding technology are given.

Key words: Self-Shielded Flux Cored Arc Welding, grooved rails

## 1. UVOD

Željeznički transportni sustav je, bez sumnje, vrlo značajan izum 19. stoljeća. Otvorio je nove horizonte u razvoju društva omogućujući i bolju povezanost naseljenih mjesta i brže kretanje materijala i dobara. Osnovna motivacija razvoja tog sustava počinje na smanjenju trenja između kotača i vagona i površine po kojoj se kotač kotrlja. Konačni rezultat razvoja, u kojem je, među ostalim, značajna točaka bio i izum parne lokomotive, jest željeznička mreža proširena po cijelom svijetu.

Suvremeni željeznički sustavi izloženi su intenzivnom prometu, velikim brzinama i opterećenjima. Stoga je vrlo važno da materijal od kojega su izrađene željezničke komponente odgovara postavljenim zahtjevima. Pogodnost nekog materijala za primjenu u željeznici određuju brojni kriteriji među kojima je najvažniji strukturni integritet koji se u eksploataciji narušava mehanizmima zamora materijala, nedostatkom otpornosti prema krhkom lomu, lokaliziranom plastičnom i intenzivnim trošenjem.

Čelik je materijal s relativno velikim vrijednostima modula elastičnosti, vrstne i udarnog rada loma te dobrom otpornošću na trošenje. Proizvodnja čelika je masovna, što rezultira njegovom relativno niskom cijenom. Navedeno ga čini najprikladnijim materijalom za izradu tračnica, pa se za tu svrhu koristi još od 18. stoljeća.

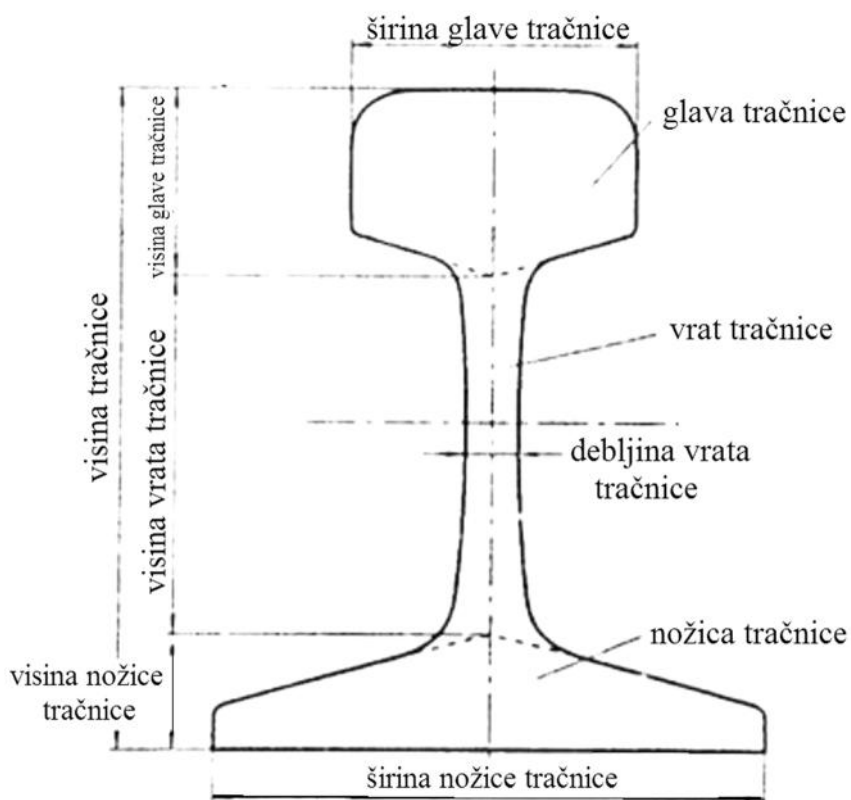
Od samog početka izrade čeličnih željezničkih tračnica i kotača, njihovi oblici se nisu značajno promijenili do danas, no svojstva čelika od kojih su izrađene današnje tračnice su gotovo neusporediva s onima kod prvotnih tračnica. To poboljšanje je ostvareno povećanjem čistoće čelika tj. smanjenjem udjela štetnih primjesa, sprječavanjem pojave mekih faza poput ferita te odgovarajućim odabirom legiranih elemenata.

Željezničke tračnice predstavljaju najvažniji i najskuplji dio kolosijeka, pa je produljenje njihovog radnog vijeka prioritet u istraživanjima. Posebna se pažnja posvećuje zavarenim spojevima tračnica jer su upravo oni potencijalna mjesta oštećenja. U ovom radu opisana je problematika zavarivanja tračnica različitim postupcima kao i svojstva dobivenih zavara [1, 2].

## 2. PREGLED TRAKA I NJIHOVIH ZNAČAJKI

Željezničke tračnice vrlo su važan element gornjeg ustroja pruge. Njena je funkcija nošenje i vođenje kotača željeznog vozila te prenošenje opterećenja na pragove ili neku drugu podlogu, a sve to uz što dulji radni vijek bez oštećenja [3]. Po svojoj građi, tračnica je elastična greda koja na najekonomičniji način treba omogućiti glatku i ravnu površinu za prijelaz i vođenje teško opterećenih vozila pri velikoj brzini [4].

Većina današnjih tračnica se sastoji od tri glavna dijela: glava, vrat i nožica. Poprečni presjek uobičajene tračnice s naznačenim dijelovima je prikazan na slici 2.1. Kako pri kretanju vozila u kolosijeku nastaju velike uzdužne i bočne sile, one dovode do velikih dinamičkih opterećenja tračnice. Zbog djelovanja tih sila, poprečni presjek tračnice je prilagođen tako da podnese njihovo djelovanje [5].



Slika 2.1. Poprečni presjek tračnice [5]

Glava tračnice je dio koji neposredno preuzima opterećenje od vozila i koji se tijekom vremena troši. Stoga je za glavu tračnice utrošeno više materijala nego što je potrebno kako bi, uslijed trošenja, tračnica mogla ispuniti svoj radni vijek.

Vrat tra nice je zaobljen prema glavi i nožici tako da je omogućeno postavljanje pri vrhnog pribora kao i njegova priljubljenost uz vrat. Visina i širina vrata tra nice su bitne za prijenos optere enja. Uobi ajeno je da širina vrata iznosi oko jedne desetine visine tra nice. Ispup ena oznaka na vratu tra nice ukazuje na glavne zna ajke tra nice kao što su:

- naziv proizvo a a
- godina i mjesec izrade
- tehnološki postupak dobivanja elika
- tip tra nice
- kvaliteta elika tra nice
- smjer valjanja.

Nožica tra nice je važna zbog prijenosa optere enja na prag i na stabilnost tra nice. Ona osigurava tra nicu od prevrtanja te smanjuje specifi ni tlak koji se prenosi na prag [5].

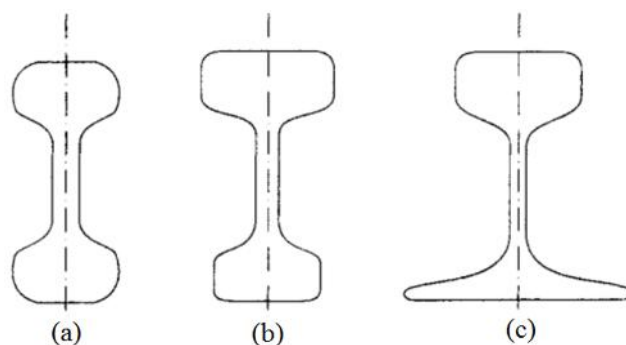
## 2.1. Povijesni razvoj

Tra nice se prvi put primjenjuju u 16. stolje u u rudnicima u Engleskoj i Njema koj. Najprije su bile izra ene od drva, a od 18. stolje a se za izradu koristi lijevano željezo. Lijevano željezo je materijal vrlo nepovoljnih mehani kih svojstava, a posebice je izražena njegova krhkost, pa su lomovi tra nica u po etku bili vrlo esti. Intenzivno trošenje je, tako er, stvaralo probleme i nametnulo dodatna ograni enja primjene tra nica. Sljede i korak u razvoju tra nica bile su uzdužne drvene grede obložene željeznim trakama. Time je dobiven gornji dio znatno otporniji na trošenje u usporedbi s drvom i donji dio otporniji na udare i lom, a sve uz ostvarenu uštedu uslijed znatno niže cijene drva u odnosu na željezo.

Za izradu tra nica, elik je, u punom smislu rije i, prvi puta upotrijebljen 1857. godine u Engleskoj. Njegova primjena je omogućila širenje željezni ke mreže širom svijeta zbog daleko boljih svojstava u usporedbi s lijevanim željezom, prvenstveno vrsto e i otpornosti na krhki lom. Prvi elik je bio uglji no-manganskog sastava s perlitnom mikrostrukturom, što je, u osnovi, istovjetno današnjim tra ni kim elicima [2, 6].

Kao što je prikazano na slici 2.2, kroz povijest se pojavljivalo nekoliko oblika tra nica [4]:

- tra nice s dvije glave
- tra nice s poja anom glavom
- tra nice s ravnim dnom (Vignoleove tra nice).



Slika 2.2. Oblici tra nica: (a) tra nica s dvije glave; (b) tra nica s pojaanom glavom; (c) tra nica s ravnim dnom [1]

S ciljem smanjenja troškova, prve tra nice su imale dvije glave. Kada se gornja glava istroši, bilo je predviđeno okretanje tra nice za  $180^\circ$  kako bi druga glava, koja je bila okrenuta prema dolje, sada preuzela funkciju vođenja kota. Međutim, kasnije se pokazalo da tijekom eksploatacije dolazi do značajnog trošenja i oštećenja donje glave na mjestima njenog kontakta s pragovima i da je ona praktički neupotrebljiva. Zbog toga se brzo odustalo od primjene ovakvih tra nica.

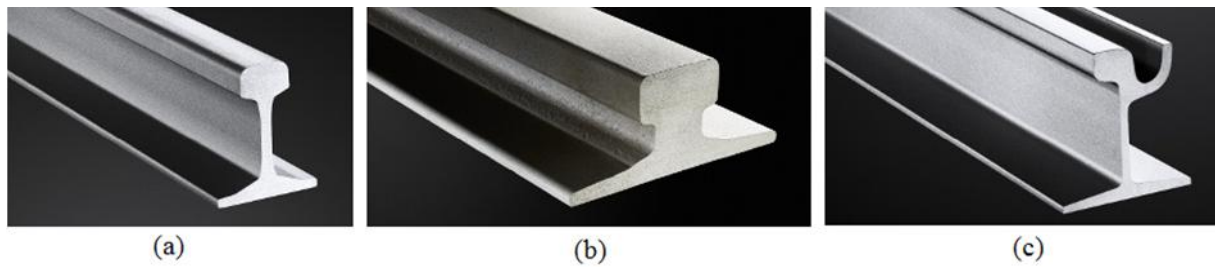
Sličan oblik ima i tra nica s pojaanom glavom, a razlikuje se samo u masivnijoj glavi kako bi joj se produljio radni vijek. Kao i tra nica s dvije glave, i ova tra nica zahtijeva posebne naprave za uležištenje kako bi se mogla pozicionirati i pri vrstiti na prag. To predstavlja značajan nedostatak ovih tra nica.

Sljedeći korak u razvoju tra nica je tra nica s ravnim dnom, često zvana Vignoleova tra nica prema svom izumitelju. Ovaj oblik se, u svojoj osnovi, zadržao do danas. Za pri vršivanje ovakvih tra nica nisu potrebne dodatne naprave. Štoviše, nožica tra nice može biti izravno pri vršena na pragovima. U usporedbi s prethodnim oblicima, ova tra nica ima veću vertikalnu i boju krutost te zahtijeva manje točaka u vršenju za istu masu po jedinici duljine. To ju, uz manje zahtjeve za održavanjem, čini značajno ekonomičnijom [4].

## 2.2. Oblici tra nica

Nakon nekoliko već spomenutih inačica koje su se pojavljivale kroz povijest, do danas su prevladala tri osnovna oblika tra nice prikazana na slici 2.3. To su Vignoleova, žljebasta i kranska tra nica te tra nice specijalnog oblika koje se relativno rijetko primjenjuju i to za posebne namjene.

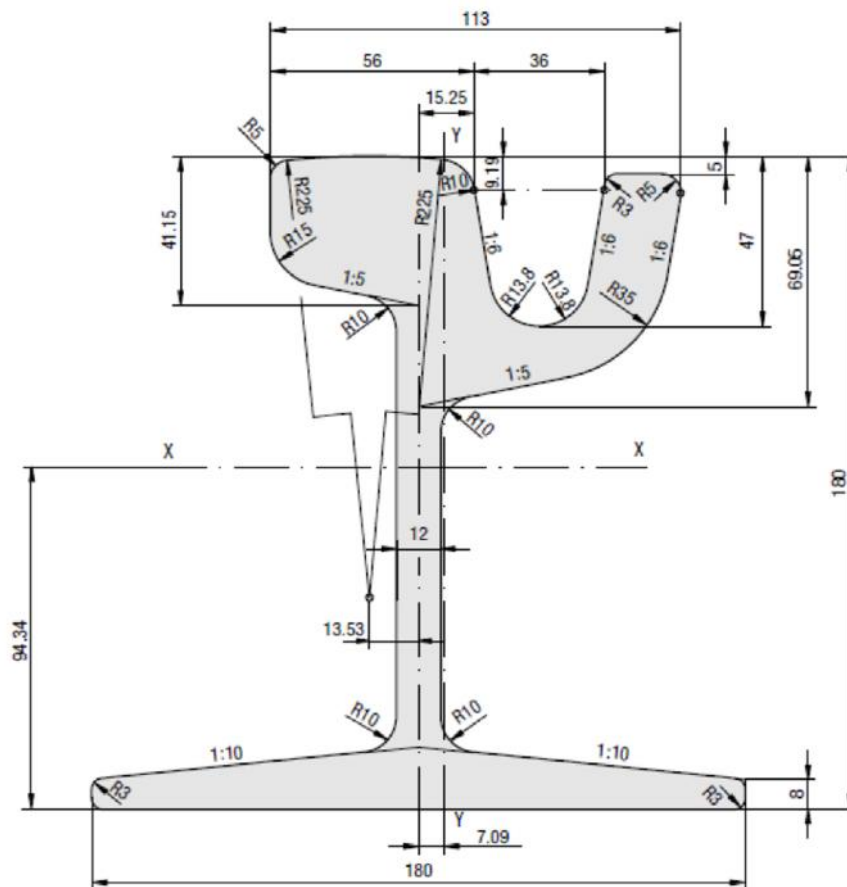




Slika 2.3. Vrste tra nica: (a) Vignoleova tra nica; (b) kranska tra nica; (c) žljebasta tra nica [7]

Vignoleova tračnica ima najrašireniju primjenu na željeznim prugama širom svijeta. Njoj sliče na je kranska tračnica s razlikom da ona kontinuirano leži na podlozi, dok se Vignoleova tračnica uobičajeno postavlja na pragove. Žljebasta tračnica se sastoji od glave, vodilice, vrata i nožice. Vrlo je česta na tramvajskim prugama gdje cestovni i tramvajski promet dijele istu prometnu površinu [3].

Na slici 2.4 su prikazane dimenzije žljebaste tra nice profila 60R1 prema normi EN 14811:2006 kakva se koristi za tramvajski promet u gradu Zagrebu. Eksperimentalni dio ovog rada je vršen na ovakvom profilu tra nice. U tablici 2.1 su navedene osnovne karakteristike takve tra nice.



Slika 2.4. Dimenzije žljebaste tračnice profila 60R1 [8]

Tablica 2.1. Osnovne karakteristike profila tra nica 60R1 [8]

Površina popre nog presjeka, cm <sup>2</sup>	77,19
Dužinska masa, kg/m	60,59
Moment tromosti $I_{xx}$ , cm <sup>4</sup>	3352,9
Moment tromosti $I_{yy}$ , cm <sup>4</sup>	928,56

### 2.3. Materijal tra nica

Kako se u suvremenim uvjetima eksploatacije željezni kih tra nica iz dana u dan pove avaju brzine i optere enja, u normama se definiraju sve ve i zahtjevi za kvalitetu elika za tra nica. Prema novim normama EN 13674-1 koja se odnosi na Vignoleove tra nica i EN 14811 koja definira žljebaste tra nica za gradski prijevoz, pove an je broj standardnih tra ni kih elika te su propisana njihova mehani ka svojstva i kemijski sastav. Posebni zahtjevi su postavljeni na kontrolu kvalitete procesa proizvodnje tra nica uvo enjem novih metoda ispitivanja radi utvr ivanja propisanih svojstava. Tako, uz svojstva koja je diktirala stara norma Me unarodne željezni ke unije, Codex UIC 860 V (vla na vrsto a, istezanje, kemijski sastav, zaostala naprezanja, sadržaj nemetalnih uklju aka, lomna žilavost), ove norme dodaju još nekoliko zahtjeva koje proizvo a i moraju zadovoljiti (brzina rasta zamornih pukotina, ispitivanje zamora materijala, zaostala naprezanja u nožici tra nica, kontinuirana ultrazvu na kontrola). Nove europske norme su uvele i nov sustav ozna avanja tra ni kih elika. Tako, na primjer, oznaka elika R 370 Cr HT ima sljede e zna enje:

R ... otporan na trošenje

370 ... tvrdo a po Brinellu na voznoj površini tra nica

Cr ... legiran kromom

HT ... toplinski obra en.

U tablicama 2.2 i 2.3 su prikazani kemijski sastavi perlitnih elika za Vignoleove odnosno žljebaste tra nica [9, 10].

Tablica 2.2. Kemijski sastav elika za Vignoleove tračnice [9]

Oznaka elika	Maseni udio elementa, %				Minimalna vrijednost tvrdoće, HB
	Ugljik	Silicij	Mangan	Krom	
R200	0,4 – 0,6	0,15 – 0,58	0,7 – 1,2	-	200
R220	0,5 – 0,6	0,2 – 0,6	1 – 1,25	maks. 0,15	220
R260	0,62 – 0,8	0,15 – 0,58	0,7 – 1,2	maks. 0,15	260
R260Mn	0,55 – 0,75	0,15 – 0,6	1,3 – 1,7	maks. 0,15	260
R320Cr	0,6 – 0,8	0,5 – 1,1	0,8 – 1,2	0,8 – 1,2	320
R350HT	0,72 – 0,8	0,15 – 0,58	0,7 – 1,2	maks. 0,15	350
R350LHT	0,72 – 0,8	0,15 – 0,58	0,7 – 1,2	maks. 0,30	350
R370CrHT	0,7 – 0,82	0,4 – 1	0,7 – 1,1	0,4 – 0,6	370
R400HT	0,9 – 1	0,2 – 0,4	1,2 – 1,3	0,2 – 0,3	400

Tablica 2.3. Kemijski sastav elika za žljebaste tračnice [7]

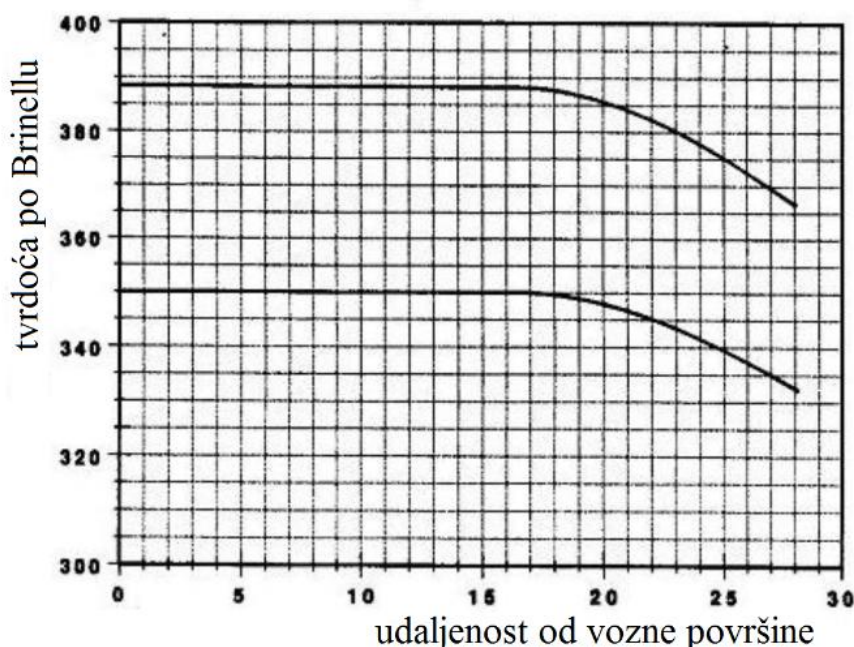
Oznaka elika	Maseni udio elementa, %			Raspon tvrdoće, HB
	Ugljik	Silicij	Mangan	
R200G	0,4 – 0,6	0,15 – 0,58	0,7 – 1,2	200 – 240
R220G	0,5 – 0,65	0,15 – 0,58	1 – 1,25	220 – 260
R260G	0,62 – 0,8	0,15 – 0,58	0,7 – 1,2	260 – 300
R260GHT	0,4 – 0,6	0,15 – 0,58	0,7 – 1,2	260 – 300
R290GHT	0,5 – 0,65	0,15 – 0,58	1 – 1,25	290 – 300
R340GHT	0,62 – 0,8	0,15 – 0,58	0,7 – 1,2	340 – 390

### 2.3.1. Perlitni elici

Uobičajeni elici za tračnice posjeduju perlitnu mikrostrukturu i sadrže oko 0,7 % C. Prosječna vrijednost tvrdoće tračnica slobodno hlađenih na zraku iznosi oko 300 HB, a vrstoće oko 700 N/mm<sup>2</sup>.

Perlit se sastoji od mekog ferita ( $\alpha$ ) i tvrdog i relativno krhkog cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) koji se u dvodimenzionalnom presjeku javljaju kao naizmjenične lamelle. Zahvaljujući tvrdom cementitu, perlit posjeduje dobru otpornost na trošenje, no povećanjem udjela cementita smanjuje se otpornost na krhki lom. Zbog povećanja osovinskog opterećenja i brzine vlakova, teži se ka daljnjem povećanju tvrdoće i vrstoće. Razmak među lamelama perlitne mikrostrukture obrnuto je proporcionalan tvrdoći, a određen je difuzijom ugljika tijekom hlađenja elika. Dva su načina regulacije difuzije ugljika: toplinska obrada, odnosno kontrola brzine hlađenja te legiranje.

Povećanjem brzine hlađenja snižava se temperatura transformacije i postiže finija perlitna struktura. Ubrzano hlađenje se posebno primjenjuje na glavi tračnice koja mora imati veću tvrdoću i otpornost na trošenje od donjeg dijela. Hlađenje glave tračnice može biti zračno, vodenim sprejom ili uljem. Ovisno o primijenjenom postupku, dobivaju se značajne razlike u raspodjeli tvrdoće, odnosno dubini otvrdnutog sloja i mikrostrukтури u glavi tračnice. Na slici 2.5 dan je primjer vertikalne distribucije tvrdoće u glavi tračnice. Kada se elik hladi velikim brzinama kakve se ovdje primjenjuju, kao rezultat transformacije može se, osim perlita, formirati i bainit i martenzit. Kako bi se izbjegle te faze, brzo hlađenje se prekida blizu početka perlitne transformacije na oko  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$  te se nastavlja slobodno hlađenje na zraku. Ovim procesom se dobiva stopostotna perlitna struktura tvrdoće 350 – 390 HB i vrstoće do oko  $1300\text{ N/mm}^2$ .



Slika 2.5. Vertikalna raspodjela tvrdoće po presjeku glave za dva različita materijala [2]

Drugi način povećanja tvrdoće tračnice je promjena njegovog kemijskog sastava. Poznato je da tvrdoća prije svega ovisi o udjelu ugljika koji je ograničen na maksimalnu vrijednost od

0,82 %, što odgovara eutektoidnom sastavu. Sve iznad tog udjela ugljika je nadeutektoidni elik kod kojega dolazi do stvaranja precipitata cementita tj. cementitne mreže na granicama perlitnih zrna, što rezultira slabljenjem granica zrna. Dodatkom vrlo male količine vanadija (do 0,05 %) u nadeutektoidni elik (0,85 %) sprečava se stvaranje cementitne mreže. Primjenom takvog elika ostvaruje se povećanje tvrdoće i smanjenje brzine trošenja tračnica za oko 20 %. Dodavanjem kroma i mangana također se mogu poboljšati svojstva perlitnog elika za tračnice. Nedostatak ovog načina povećanja tvrdoće se ogleda u značajnom smanjenju zavarljivosti elika uslijed povećanja udjela legiranih elemenata [2, 9].

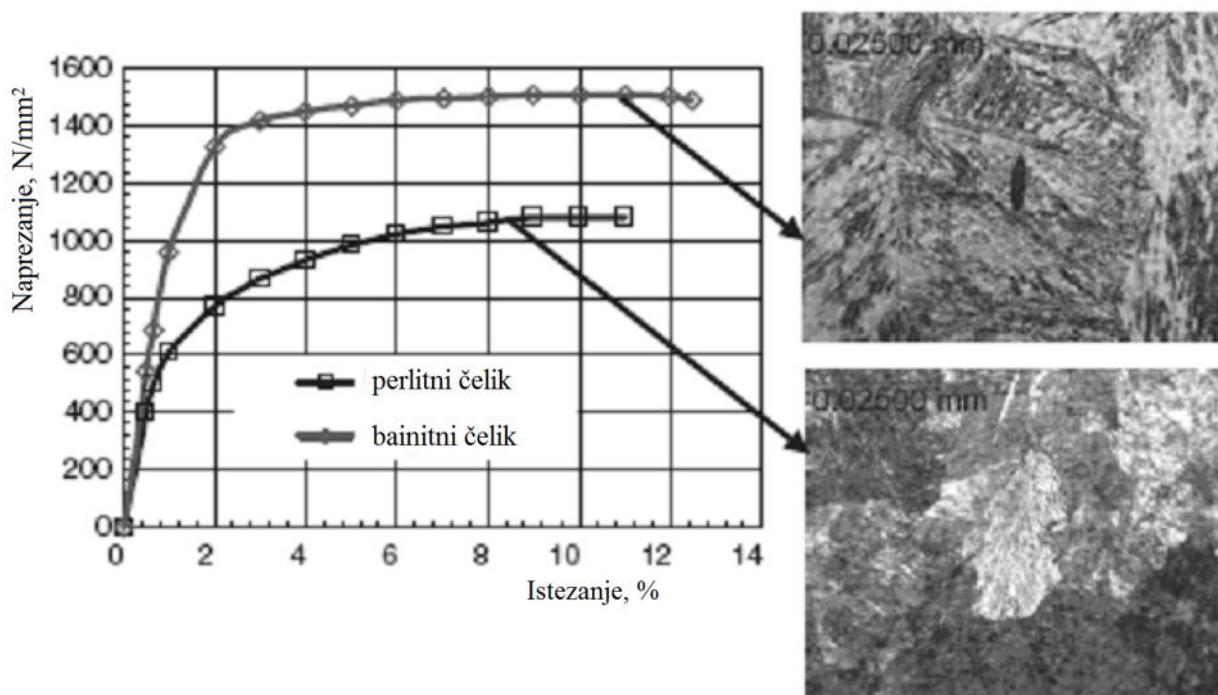
### 2.3.2. Bainitni elici

Maksimalne vrijednosti tvrdoća za perlitnu strukturu iznose oko 390 HB. Daljnje povećanje tvrdoće zahtijeva neki novi materijal, odnosno novu mikrostrukturu. U ovom slučaju radi se o bainitnoj mikrostrukтури koja postiže tvrdoću od oko 450 HB. Ova struktura nije ranije korištena zbog visokog udjela ugljika i lošije otpornosti na trošenje u usporedbi s finom perlitnom strukturom. Međutim, nove generacije niskougljinih bainitnih elika mogu zamijeniti tračnice perlitne mikrostrukture u slučaju velikih opterećenja i intenzivnog prometa. Odlikuje ih izuzetna tvrdoća, vrstoća i otpornost na trošenje, ali, zbog niskog sadržaja ugljika, i dobra zavarljivost i livljivost. Usporedni prikaz vrstoće i mikrostrukture perlitnog i bainitnog elika dan je na slici 2.6.

Bainit je mješavina sitnih, kuglastih čestica karbida i ploštastog ferita. Ugrubo se može podijeliti na gornji i donji bainit. Gornji bainit ima grubozrnatu strukturu s relativno nepovoljnim svojstvima, dok je donji fine iglaste strukture sa znatno povoljnijom vrstoćom i otpornošću na krhki lom. Dodavanjem različitih legiranih elemenata mogu se regulirati temperature i vremena transformacija, a time i dobivena mikrostruktura i svojstva elika. Tako molibden usporava formiranje feritne i perlitne faze omogućavajući nastanak bainita. Nikal, krom i mangan snižavaju temperaturu početka bainitne transformacije i povećavaju vrstoću. Silicij ojačava ferit i poboljšava otpornost na trošenje. Najveći utjecaj na sniženje temperatura početka bainitne i martenzitne pretvorbe ima ugljik te se, variranjem njegovog udjela, može dobiti širok spektar bainitnih struktura. Dodatkom bora odgađa se perlitna transformacija, pa on može služiti kao djelomična zamjena za krom i molibden.

Daljnje povećanje vrstoće i udarnog rada loma bainitnih elika može se postići povećanjem broja karbidnih čestica. Snižanjem temperature transformacije dolazi do usitnjavanja karbidnih čestica koje predstavljaju prepreku gibanju dislokacija i time dovode do poboljšanja mehaničkih

svojstava. Valja naglasiti da tračnice od bainitnog čelika postižu odlična svojstva unatoč niskom sadržaju ugljika, nasuprot perlitnim čelicima s visokim udjelom ugljika.



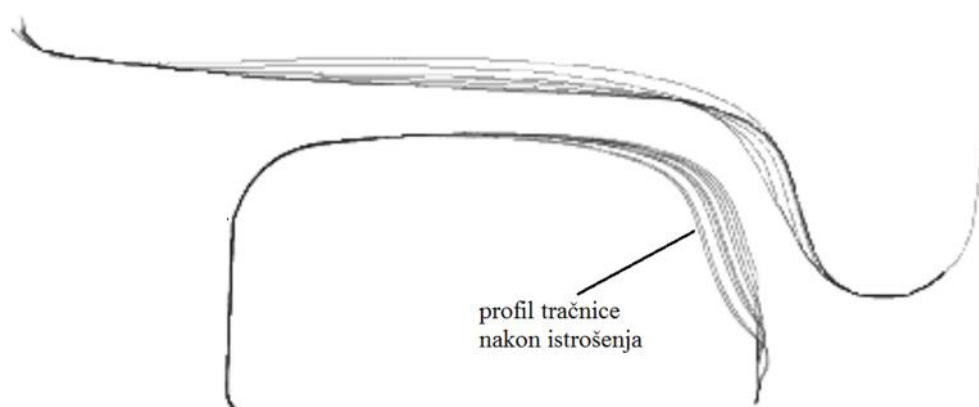
Slika 2.6. Usporedba vrsto i mikrostrukture perlitnog i bainitnog čelika [2]

S ciljem dodatnog poboljšanja svojstava, razvijeni su i bainitni čelici bez karbida. Izlučivanje cementita tijekom bainitne pretvorbe sprečava se dodatkom oko 1,5 % silicija koji ima vrlo nisku topivost u cementitu i efikasno zaustavlja njegov rast. Dobivena mikrostruktura se sastoji od vrlo malih pločica ferita i austenita zasićenog ugljikom. Duktilni sloj austenita ima funkciju kočenja propagacije pukotine. Problem može nastati ako zaostanu veliki blokovi austenita koji se pod utjecajem opterećenja mogu transformirati u tvrdi, ali krhki martenzit. Ovakva struktura posjeduje dobra mehanička svojstva, a posebna prednost joj je bolja otpornost na kontakti zamor uslijed odsustva krhkih faza [2].

## 2.4. Oštećenje tračnica

Trošenje je glavni uzrok zamjene tračnica na gotovo svim prugama. Uglavnom je koncentrirano na unutarnjem rubu vanjske tračnice u zavoju na mjestima gdje vijenac kotača dodiruje tračnicu. Na ravnim dijelovima pruge trošenje je prisutno na gornjoj površini glave tračnice. Trošenjem, tj. gubitkom mase, raste naprezanje u tračnici. Kako bi se izbjegla havarija, nužna je zamjena tračnice. Kriteriji za zamjenu su različiti za svaku pojedinu prugu, no uglavnom se kreću u intervalu od 30 % do 50 % istrošenosti volumena glave tračnice [11].

Kontaktne zone između kota i tračnice je vrlo mala, obično oko  $1 \text{ cm}^2$ , no mora biti dovoljno čvrsta i tvrda da izdrži normalnu komponentu sile uzrokovane velikim opterećenjem i dinamičkim odzivom uslijed nepravilnosti tračnice i kota. Tangencijalna komponenta sile u kontaktnoj zoni mora biti dovoljno mala kako bi se omogućilo pomicanje teških tereta uz relativno mali otpor, ali treba biti i dovoljno velika kako bi se omogućila vuča, kočenje i skretanje vlaka. Normalna naprezanja koja se javljaju u zoni kontakta mogu dosegnuti vrijednosti nekoliko puta veće od vlačne čvrstoće kota ili tračnice, a smično naprezanje u ravnini kontakta može prijeći i smičnu čvrstoću materijala [11]. Posljedica je trošenje koje se definira kao gubitak ili tečenje materijala s kontaktne površine. Na slici 2.7 je prikazana promjena oblika tračnice i kota uslijed trošenja. Trenje između kota i tračnice, nužno za kretanje vlaka, ograničeno je faktorom trenja. Ako tangencijalna sila pogonskih kota premaši to trenje, dolazi do proklizavanja i intenzivnog trošenja tračnice [12].



Slika 2.7. Promjena oblika tračnice i kota uslijed trošenja [12]

Generalno, mnogo je mehanizama trošenja i oštećivanja koji se mogu pojaviti na dodirnoj površini dvaju tijela. U slučaju tribološkog para tračnica – kota najznaniji mehanizmi su:

- adhezija
- zamor materijala
- abrazija
- plastična deformacija.

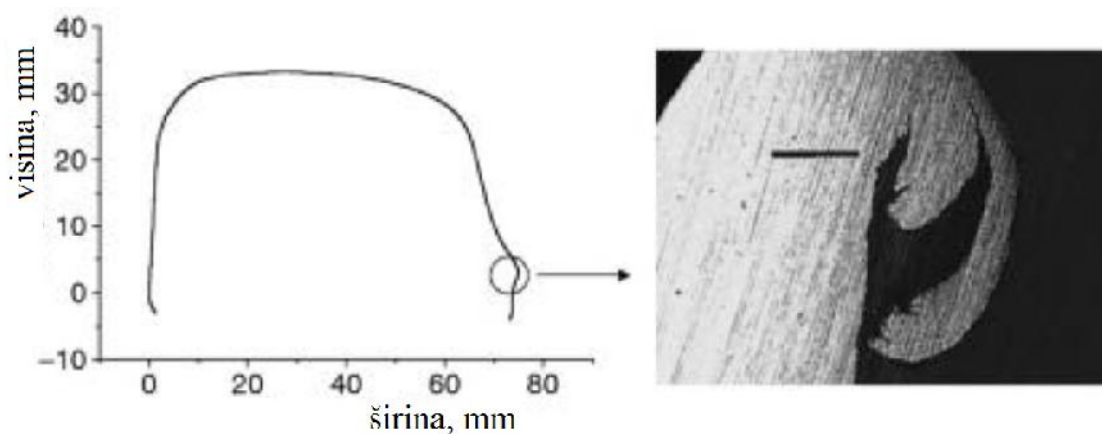
Mehanizam adhezijskog trošenja se temelji na činjenici da se kontakt između dviju površina ostvaruje samo u nekoliko točaka, tj. u vrhovima hrapavosti. U tim točkama dolazi do spajanja,

odnosno mikrozavarivanja. Kada se površine gibaju relativno u odnosu jedna na drugu, ti spojevi pucaju tako da se obično otkida dio mekšeg materijala i lijepi se na tvrdi.

Pukotine uzrokovane zamorom materijala tračnice dijele se na pukotine inicirane na površini i one ispod površine. Potonje se vežu za metalurške pogreške dok površinske pukotine nastaju uslijed intenzivnog prometa i dinamičkog opterećenja. Detaljnija podjela oštećenja se vrši prema obliku i mjestu nastanka. Neovisno o vrsti oštećenja, konačni rezultat uglavnom je nastanak iverja uslijed ljuštenja metala te nastanak rupica nepravilnog oblika na tračnici.

Abrazivno trošenje nastaje zbog relativnog gibanja tvrde površine po mekšoj ili zbog gibanja tvrdih čestica koje su ostale zarobljene između dviju površina. Te tvrde čestice mogu biti zrnca pijeska ili kamena ili pak komadi čelika nastali zamorom tračnice ili kotača.

Plastična deformacija je također bitan mehanizam oštećivanja tračnice. Na ravnom dijelu pruge kotač je u kontaktu s gornjom površinom tračnice, no u zavoju vijenac kotača može doći u kontakt s rubom tračnice. Tada se opterećenje s kotača prenosi na tračnicu preko vrlo male površine uz vrlo velika naprezanja. Rezultat je premašivanje granice elastičnosti te, konačno, plastična deformacija. Dubina plastičnog tečenja ovisi o tvrdoći tračnice i radijusu zavoja, a može doseći čak 15 mm. Na slici 2.8 prikazan je primjer plastičnog tečenja materijala na dijelu glave tračnice [12].



Slika 2.8. Plastično tečenje materijala na glavi tračnice [12]



### 3. ZAVARIVANJE TRAKA

Zavarivanje traka je postupak spajanja pojedinačnih traka ugrađenih na kolosijek ili prije ugradbe u kolosijek primjenom topline i/ili pritiska. Trake se mogu zavariti u proizvodnim radionicama ili na mjestu ugradnje. U radionicama se, zbog sniženja troškova, teži izraditi trake što veće duljine, čak do 300-tinjak metara. To se izvodi zavarivanjem traka osnovnih duljina koje se kreću u oko 20 metara. Dobiveni dugi trakovi traka se, zatim, međusobno zavaruju u kolosijeku čineći tako neprekidnu traku. Također, zavarivanje traka se vrši i uslijed puknuća traka ili njihove zamjene zbog oštećenosti. Ovisno o mjestu gdje se trake zavaruju kao i o dostupnoj opremi, u praksi su prisutni sljedeći postupci:

- zavarivanje iskrenjem
- aluminotermijsko zavarivanje
- ručno elektrolučno zavarivanje
- zavarivanje samozaštitnom praškom punjenom žicom
- plinsko zavarivanje.

Treba napomenuti da je plinski postupak moguće primijeniti za zavarivanje traka, ali se vrlo rijetko koristi zbog niske produktivnosti i loše kvalitete zavarivanja u usporedbi s drugim navedenim postupcima. Zavarivanje traka primjenom prvih četiri postupka je detaljno opisano u nastavku rada [3, 13].

#### 3.1. Zavarljivost tražnih elemenata

Zavarljivost tražnih elemenata prvenstveno ovisi o njegovom kemijskom sastavu koji se uobičajeno izražava pomoću ekvivalenta ugljika ( $C_{ekv}$ ), a kojem je zavarljivost obrnuto proporcionalna. Dakle, što je ekvivalent ugljika veći, element se smatra teže zavarljivim. Ekvivalent ugljika se izražava prema formuli:

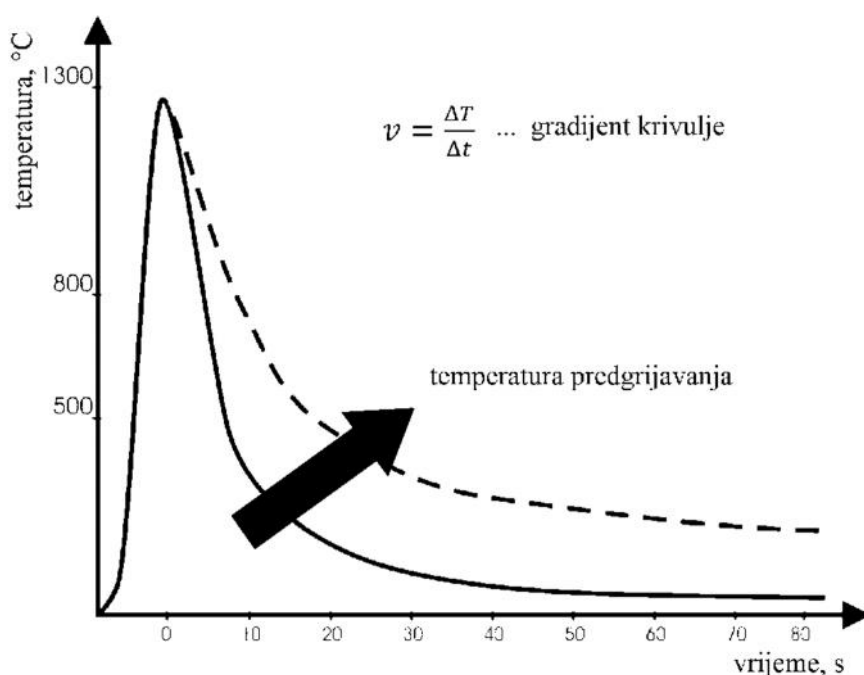
$$C_{ekv} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (3.1)$$

Općenito se može reći da veći udio legiranih elemenata u materijalu pri zavarivanju ima za posljedicu veću vjerojatnost nastanka krhke mikrostrukture tijekom hlađenja. Naime, legirani elementi odgađaju perlitnu transformaciju olakšavajući time nastanak krhke martenzitne faze. Najvjerojatnije područje za nastanak martenzita je zona utjecaja topline (ZUT) koja se nalazi između vrućeg metala zavarivanja i hladnog osnovnog materijala. Ta velika razlika temperatura

uzrokuje brzo hlađenje, tj. kaljenje ZUT-a u kojem tada dolazi do pojave martenzita. Brzina hlađenja ( $v$ ) funkcija je razlike temperatura ( $T$ ) i vremenskog intervala ( $t$ ) u kojemu se ta temperaturna razlika ostvaruje:

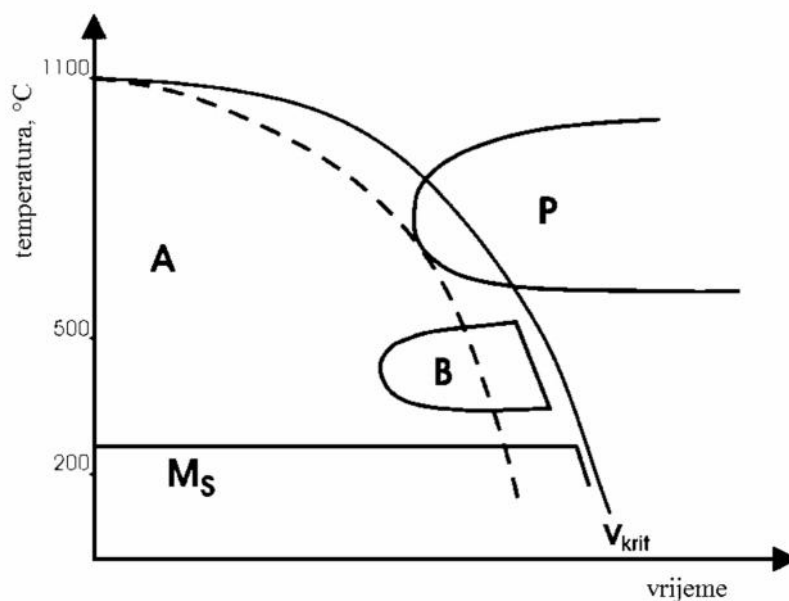
$$v = \frac{\Delta T}{\Delta t}. \quad (3.2)$$

Odabirom prikladnog dodatnog materijala može se utjecati na kemijski sastav metala zavara, a tako i na njegova fizikalna i metalurška svojstva. Međutim, na zbijanja u ZUT-u ne utječe dodatni materijal, nego isključivo brzina hlađenja. Ona se može smanjiti povećanjem temperature predgrijavanja kako prikazuje slika 3.1.



Slika 3.1. Krivulja promjene temperature u ovisnosti o temperaturi predgrijavanja [9]

Da bi se ostvarila perlitna mikrostruktura, brzina hlađenja mora biti manja od kritične brzine ( $v_{krit}$ ). Kritična brzina se određuje iz pripadajućeg TTT dijagrama (*Time Temperature Transformation*) za kontinuirano hlađenje. Kvalitativni prikaz TTT dijagrama dan je na slici 3.2 [9].



Slika 3.2. TTT dijagram s ucrtanim krivuljama hla enja; A ... austenit; B ... bainit; P ... perlit;  $M_s$  ... martenzit [9]

### 3.2. Zavarivanje iskrenjem

Zavarivanje iskrenjem je elektrootporni postupak zavarivanja koji se esto koristi za su eljeno spajanje tra nica, naro ito u radionici pri izradi dugih tra nica. Kako se može vidjeti na slici 3.3, tra nice se su eljeno priljubljuju jedna uz drugu te se kroz spoj provodi jaka elektri na struja koja, uslijed pove anog otpora, intenzivno zagrijava rubni dio tra nica gotovo do kapljevito stanja. Me usobnim pritiskanjem tra nica ostvaruje se zavareni spoj.

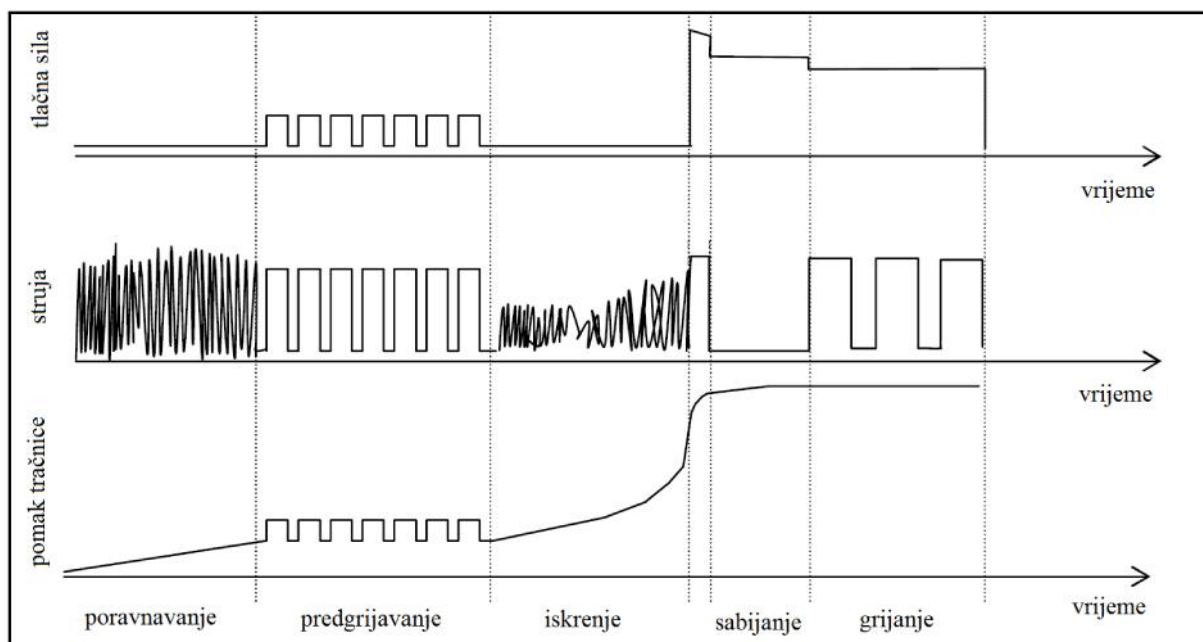
Oprema za ovaj postupak je velika i masivna pa, iako postoje mobilni ure aji, zavarivanje iskrenjem se rijetko primjenjuje na terenu. Trenutno je ovo najbrži, najkvalitetniji i najjeftiniji postupak zavarivanja tra nica u slu aju velikoserijske proizvodnje. Kapacitet jednog ure aja doseže 100 kvalitetnih zavara u jednoj smjeni. Pored novoizra enih, zavaruju se i tra nice koje su odre eni period ve bile u eksploataciji. U tom slu aju posebnu pažnju treba posvetiti kvalitetnoj pripremi spoja tj. ispravljanju savijenih krajeva, uklanjanju ošte enja, ne isto a, masno e i korozijskih produkata [9, 13].



Slika 3.3. Zavarivanje tra nica iskrenjem [9]

Ure aj je, u pravilu, statino postrojenje pri emu je jedna strana nepomi na, a druga ima mogućnost pomicanja po vodilicama u smjeru uzdužne osi tra nice. Svaka strana ure aja ima eljusti namijenjene za prihva anje krajeva tra nica koje ujedno služe i kao kontaktno mjesto za dovod elektri ne energije potrebne za zavarivanje. Ovisno o presjeku tra nice i kvaliteti materijala, napon zavarivanja se kre e u rasponu 6 – 15 V dok jakost struje doseže i 1000 A. Nakon iš enja rubova, tra nice se dopremaju u stroj za zavarivanje, a krajevi tra nica se stežu eljustima. Sila stezanja mora biti dovoljno velika kako tijekom procesa zavarivanja ne bi došlo do nepoželjnih pomaka [13].

Proces se odvija kroz nekoliko faza kako je prikazano na slici 3.4. Prva faza ima za cilj poravnavanje dodirnih površina i uklanjanje oksida. Dvije tra nice se me usobno približavaju dok se ne dodirnu u najizbo enijim to kama. Strujni krug se zatvara te u tim to kama pote e struja velike gusto e koja uzrokuje brzo lokalno zagrijavanje, taljenje i isparavanje materijala. Uslijed visokog tlaka uzrokovanog nastalim parama, rastaljeni metal se izbacuje iz zazora zajedno s oksidima i ne isto ama. Ova faza se odvija bez primjene tla ne sile koja me usobno pritiš e tra nice, a traje dok dodirne površine ne postanu potpuno paralelne.



Slika 3.4. Promjena parametara procesa zavarivanja iskrenjem u ovisnosti o vremenu [9]

Druga faza je predgrijavanje. Svrha joj je ravnomjerno zagrijavanje rubova tračnice po cijelom presjeku. Tračnice se priljubljuju uz primjenu dodatne sile koja omogućuje izbacivanje rastaljenog metala iz zazora. Struja velike jakosti zagrijava dodirnu površinu koja sada odgovara cijeloj površini presjeka. Nakon određenog vremena kontakta, tračnice se odmiču pa se ponovno primaju jedna drugoj kako bi se postigla što uniformnija raspodjela temperature po cijelom presjeku tračnice. Taj proces se ponavlja četiri do dvadeset puta. Indikator postizanja ravnomjerne raspodjele temperature je opadanje tlačne sile potrebne da bi se tračnice međusobno pomaknule za istu udaljenost. Tlačna sila opada jer se s obzirom na zagrijavanje sve lakše deformira.

Treća faza je iskrenje koje sprema oksidaciju dodirnih ploha. U brojnim dodirnim točkama nastaju mali krateri iz kojih je izbačen rastaljeni metal. Ako je dodirnih točaka premalo, proces postaje nejednolik, a unos topline se koncentrira na malom području što rezultira jakim prskanjem i velikim kraterima. Preveliki krateri ne mogu biti istisnuti sabijanjem, te uzrokuju greške u zavarenom spoju.

U posljednjoj, četvrtoj fazi se vrši međusobno sabijanje tračnica. Tada zapravo nastaje zavareni spoj. Dodirne plohe se priljubljuju uz primjenu velike tlačne sile uz još uvijek prisutnu visoku struju koja štiti plohe od oksidacije dokle god se one potpuno ne spoje. Uslijed jakog pritiska zagrijani i omekšani elementi se plastično deformiraju i biva istisnut izvan zazora čineći ih sferičnog oblika. Ako pritisak nije dovoljno velik, dio rastaljenog metala može ostati

zarobljen u zazoru. Takav grumen metala ima lijeva ku grubozrnatu strukturu s neprihvatljivim mehani kim svojstvima.

Kona no, zavareni spoj se treba hladiti brzinom hla enja sukladno zahtjevima za materijal tra nice. Ako elik sadrži relativno velik udio legirnih elemenata, potrebno je naknadno zagrijavanje zavara kako bi se sprije io nastanak martenzitne strukture. Naposljetku se uklanja srh, zavar se brusi te se, eventualno, vrši naknadna toplinska obrada [1, 9, 13].

### 3.3. Aluminotermijsko zavarivanje

Aluminotermijski postupak zavarivanja, prikazan na slici 3.5, esto se primjenjuje za zavarivanje tra nica na terenu, a primjenjiv je za sve vrste tra ni kih profila. Produktivan je i mobilan jer ne zahtijeva veliku opremu kao ni pristup elektri noj energiji. Spajanje tra nica se ostvaruje pomo u pregrijane taline koja nastaje egzotermnom kemijskom reakcijom izme u željezovog oksida  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i aluminija koji vrši ulogu redukcijskog sredstva. Reakcija se pokre e pri oko  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  u smjesi navedenih reaktanata koja se naziva termitna smjesa. Troska aluminijevog oksida, zbog niže gusto e, pluta na površini taline i štiti rastaljeni elik od okolne atmosfere. Proces se odvija u loncu sa zatvara em koji se otvara kada se postigne tražena temperatura taline (nešto manje od  $2500\text{ }^\circ\text{C}$ ), te ona tada po inje te i kroz kalupom ome enu šupljinu izme u tra nica koje se zavaruju. U termitnu smjesu se mogu dodati legirni elementi s ciljem regulacije kemijskog sastava metala zavara. Osim toga, dodaju se aditivi koji pospješuju te enje taline i snižavaju temperaturu skru ivanja aluminijevog oksida [9, 13].



Slika 3.5. Zavarivanje tra nica aluminotermijskim postupkom [9]

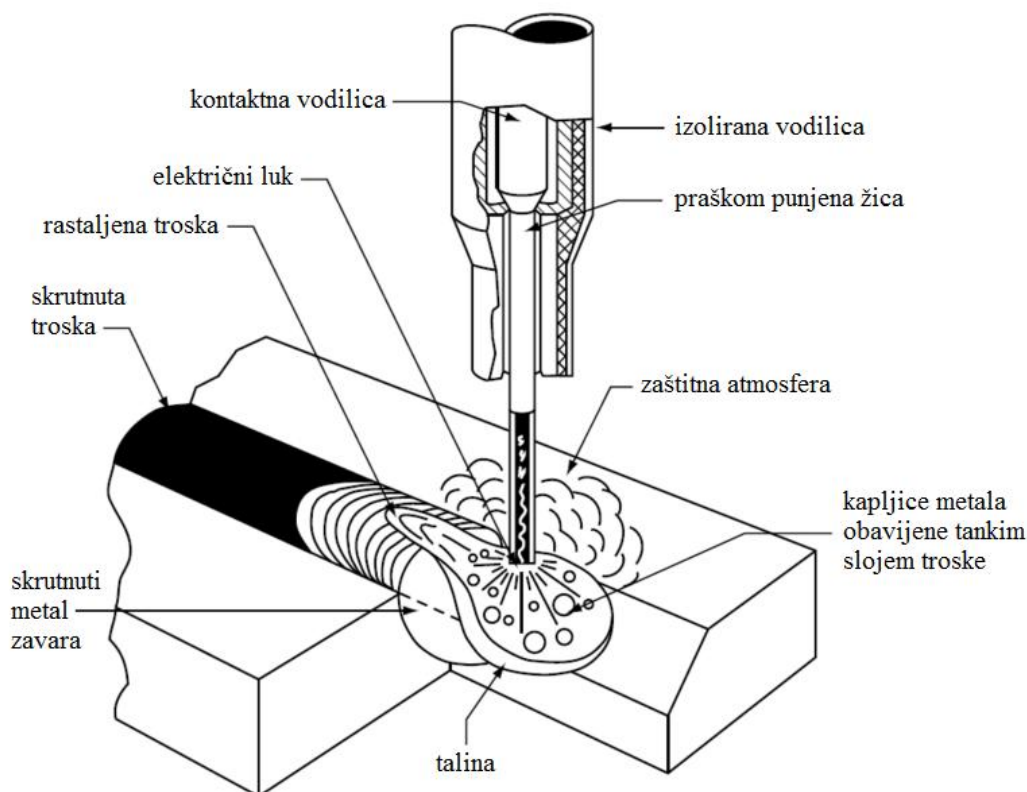
Prvi korak prilikom zavarivanja tračnica je rezanje tračnice i njihovo međusobno poravnavanje. Šrafova moraju biti uklonjena sve neistovremeno, masno i korozijski produkti. Razmak između tračnica mora biti jednak, a obično se kreće u rasponu od 20 do 30 mm ovisno o vrsti tračnice. Zatim se na tračnice postavlja pješčani kalup i ostala oprema potrebna za odvijanje procesa. U pravilu se vrši predgrijavanje tračnica, najčešće plinskim plamenikom. Kada su tračnice predgrijane, iznad kalupa se postavlja lonac s termitnom smjesom te slijedi paljenje smjese. Toplina egzotermne reakcije stvara talinu koja se, nakon uklanjanja zatvarača na loncu, izlijeva u kalup ispunjavajući i zazor između tračnica i čineći zavareni spoj. Nakon skrućivanja taline kalup i pripadajuća oprema se uklanjaju, a nastali sruh najčešće se odstranjuje pomoću hidrauličnog uređaja. Eventualno se provodi naknadna toplinska obrada. Na kraju slijedi brušenje kako bi se postigla zahtijevana geometrija tračnice.

Osnovne prednosti aluminotermijskog postupaka zavarivanja proizlaze iz njegove jednostavnosti i mobilnosti, no kvalitetu dobivenog zavarivača je prikladnije ubrojiti pod nedostatke nego pod prednosti. Naime, zavareni spoj se ostvaruje lijevanjem, dok je tračnica proizvedena procesom valjanja. Zbog izraženih razlika u tim procesima izrade, značajne su razlike u mikrostrukтури, pa je ponašanje zavarenog spoja u eksploataciji drukčije od ostatka tračnice [9, 13, 14].

### **3.4. Zavarivanje samozaštitnom praškom punjenom žicom**

Kada zbog propisa, zahtijevanih svojstava ili drugih tehničkih razloga zavarivanje tračnica nije moguće izvesti aluminotermijskim ili elektrootpornim postupkom, može se primijeniti zavarivanje samozaštitnom praškom punjenom žicom. Engleski naziv je *Self-Shielded Flux Cored Arc Welding* od kojega potječe skraćenica FCAW-S [14].

Ovo je elektrolitički postupak kod kojega se, kao dodatni materijal, koristi kontinuirana žica koja se tali u električnom luku. Žica nije puna, nego je ispunjena praškom, tj. smjesom minerala koji izgaranjem i isparavanjem stvaraju plinove i time štite talinu od okolne atmosfere. Stoga nikakva dodatna zaštita taline nije potrebna. Osim zaštite, prašak vrši ulogu poboljšanja metalurških i fizikalnih svojstava metala zavarivača te regulacije njegovog kemijskog sastava. Preostali dio praška, koji se nije pretvorio u plin, stvara trosku koja oblikuje lice zavarivača i usporava njegovo hlađenje. Shematski prikaz procesa je dan na slici 3.6.



Slika 3.6. Shematski prikaz procesa zavarivanja FCAW-S postupkom [15]

Postupak je prvotno korišten kao zamjena za ručno elektrodočno zavarivanje elektrodama (REL) jer se njime može ostvariti veća produktivnost i bolja kvaliteta zavora. Povećanje produktivnosti se temelji na izostanku uzastopnog prekidanja zavarivanja zbog izmjene elektroda u slučaju REL-a. Uzastopno prekidanje rezultira i velikim brojem početaka i završetaka zavora, tj. velikom broju nastavaka koji se smatraju mjestom visokog rizika od nastanka greške. Izbjegavanjem nastavaka umanjuje se broj grešaka i povećava kvaliteta zavora.

Iako je zavarivanje FCAW-S postupkom uglavnom istisnuto od strane FCAW-G postupka koji se od prvoga razlikuje u dodatnoj zaštiti plinom, FCAW-S postupak je ipak zadržao primjenu u nekim područjima. Gotovo je nezamjenjiv pri montaži velikih zgrada, u brodogradnji, pri izradi cjevovoda i na drugim terenskim radovima gdje vjetar može stvarati probleme otpuhujući i zaštitni plin. FCAW-S postupak ne zahtijeva dodatnu plinsku zaštitu, dakle, nema potrebe za plinskim bocama što značajno pridonosi njegovoj mobilnosti. Također, eliminirani su troškovi zaštitnog plina i opreme vezane uz isti, a pištolj postaje jednostavniji i manji. Pištolj ima usku vodilicu jer nema plinsku sapnicu, pa priprema spoja može biti uža. Iz toga proizlaze dodatne uštede vremena i dodatnog materijala [14].



Karakteristika postupka je relativno dugi slobodni kraj žice koji se kreće od 19 mm do 95 mm ili čak i više u posebnim slučajevima. Povećanjem duljine slobodnog kraja žice, povećava se i otpor zagrijane elektrode što ujedno predgrijava elektrodu i smanjuje napon električnog luka, a što dalje ima za posljedicu smanjenje struje zavarivanja. S druge strane, gustoća jakosti struje kod praškom punjenih žica je veća u odnosu na pune žice jer je površina metala koja se mora rastaliti manja kod praškom punjene žice, nego kod žice punog presjeka. Posljedica toga je znajno veća količina depozita u jedinici vremena kod istih vrijednosti jakosti struje zavarivanja [16].

### 3.5. Ručno elektrolučno zavarivanje

REL postupak je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom obloženom elektrodom. Karakterizira ga uzastopno prekidanje procesa zbog izmjene elektrode. To predstavlja značajan nedostatak jer, kao što je već objašnjeno, umanjuje produktivnost i kvalitetu. Ipak, postupak je još uvijek zastupljen pri zavarivanju tračnica, a naročito kod zavarivanja tramvajskih žljebastih tračnica. Razlog tome je jednostavnost, mobilnost i niska cijena opreme te niski zahtjevi za obuku zavarivača. S ciljem povećanja produktivnosti često se u spoj između tračnica dodaje posebno oblikovana čelična ploča debljine 15 – 20 mm. Na slici 3.7 je prikazano zavarivanje tramvajske tračnice REL postupkom uz uporabu takve ploče [17].



Slika 3.7. Zavarivanje žljebaste tračnice REL postupkom uz upotrebu čelične ploče [17]

#### 4. OSVRT NA TRAMVAJSKE TRAMVAJE U SUSTAVU ZET-a

U Zagrebu je 5. rujna 1891. godine gradskim ulicama prvi puta, planirano i organizirano, započeo promet tramvajskim kolima pokretanim konjskom snagom. Dvadesetak godina kasnije kolosijeci se elektrificiraju te se uvodi električni tramvaj. Od tada se tramvajski promet kontinuirano širi i razvija. Značajna točka u tom razvoju je bila 2005. godina kada se uvode prvi niskopodni tramvaji [18].

Uvođenje tih tramvaja je, osim unaprjeđenja i modernizacije gradskog prijevoza, a uslijed njihove velike mase i relativno krute amortizacije, izazvalo povećana opterećenja i oštećenja tramvajske infrastrukture, prvenstveno tračnice. Izražena dinamika opterećenja uzrokuje uсталo pucanje tračnice, u pravilu, u području zavarenog spoja.

Na kontaktnoj površini između kotača i tračnice odvija se prijenos sile od vozila na donje dijelove kolosijevne konstrukcije. Pri tome raspodjela naprezanja tračnice ima oblik silan pješanom satu što znači da su pri vrhu tračnice najveća tlačenja, a pri dnu najveća vlačna naprezanja. Središnji dio tračnice, teoretski, karakterizira neutralna zona. Maksimalna naprezanja na kontaktnoj površini između kotača i tračnice, u slučaju zagrebačkih tramvajskih kolosijeka, mogu dosegnuti vrijednosti i do  $350 \text{ N/mm}^2$ . Još valja napomenuti da se tramvajske pruge u Zagrebu ubrajaju među visokoopterećene. Naime, pojedini kolosijeci u centru Zagreba na godinu imaju prometno opterećenje i do 15 milijuna bruto tona po presjeku s frekvencijom prolaska tramvaja ispod 1 minute.

Tijekom eksploatacije, zbog kretanja vozila po kolosijeku, tračnica je izložena različitim, prethodno opisanim, mehanizmima trošenja. Pri tome se razlikuje visinsko trošenje glave tračnice na ravnim dijelovima trase te dodatno povećano trošenje glave vanjske tračnice u zavoju. Na intenzitet trošenja utječe niz čimbenika, a u prvom redu je otpornost na trošenje ugrađenih tračnica koje je usko povezano s njihovom tvrdoćom. Dakle, gledajući iz perspektive trošenja, tvrdoća je ključno svojstvo materijala tračnice koje određuje životni vijek tračnice u eksploataciji. To se posebno odnosi na tračnice u zavojima. Naime, pokazalo se da se u zavojima malih polumjera prije dosegne dopuštena granica istrošenja tračnice negoli nastane oštećenje uslijed zamora materijala. No, na ravnim dijelovima trase vrijedi suprotno. Tračnice iziskuju zamjenu prvenstveno zbog oštećenja nastalog uslijed zamora materijala, a ne djelovanjem mehanizama trošenja. Brzina napredovanja povećanog trošenja može biti i do 10 puta veća od visinskog trošenja tračnica na ravnom dijelu trase.

Zbog navedenih razloga se na zagrebačkim tramvajskim kolosijecima na ravnim dijelovima trase ugrađuju tračnice od čelika s minimalnom vlačnom vrstom od  $680 \text{ N/mm}^2$ , a u zavojima i u zonama sklopova ugrađuju tračnice koje karakterizira vlačna vrstom a u minimalnom iznosu od  $880 \text{ N/mm}^2$ , povećana tvrdoća, a time i povećana otpornost na trošenje [19].

#### **4.1. Tehnologija zavarivanja**

Tramvajske tračnice u gradu Zagrebu se zavaruju dvama postupcima, ručnim elektrolučnim i postupkom zavarivanja samozaštitnom praškom punjenom žicom. Ranije korišteni aluminotermijski postupak više nije u uporabi. U nastavku je detaljno opisana tehnologija zavarivanja primjenom oba postupka.

##### **4.1.1. Zavarivanje tračnice ručnim elektrolučnim postupkom**

Uobičajena tehnologija zavarivanja tramvajskih tračnica u Zagrebu podrazumijeva zavarivanje REL postupkom. Priprema spoja se izvodi plinskim rezanjem tračnice bez predgrijavanja te poravnavanjem i brušenjem oksidirane rezne površine kutnom brusilicom. Razmak između tračnica se kreće od 15 mm do 20 mm, a s donje strane se postavlja podložna čelična pločica dimenzija  $25 \times 5 \text{ mm}$ . Korišteni dodatni materijal su bazične obložene elektrode promjera 3,25 mm i 5 mm, oznake HRN EN ISO 2560-A: E 50 4 Mo B 42 H5, EVB 60, proizvođača Elektrode Jesenice. Elektrode se, prema zahtjevu proizvođača, najmanje jedan sat peku na  $400^\circ\text{C}$  te se kasnije uvaju u elektrootporno grijanim tobovcima na temperaturi od približno  $100^\circ\text{C}$ , a sve s ciljem smanjenja količine vodika u zavarenom spoju.

Specifičnost ove tehnologije je upotreba specijalne umetne čelične pločice s ciljem pojednostavljenja procesa i skraćivanja vremena zavarivanja. Nakon što se, uz pomoć podložne pločice, zavari nožica tračnice, u zazor između tračnica se postavlja umetna pločica kako je prikazano na slici 4.1. Ona služi kao podloga pri zavarivanju glave i vodilice tračnice, a s vratom i nožicom se povezuje kutnim zavarima.



Slika 4.1. Postavljena specijalna umetna ploča nakon zavarivanja nožice tračnice [20]

Nedostaci ovakve tehnologije su brojni. Kao prvo, postavljanjem umetne ploče i njenim povezivanjem s tračnicom pomoću kutnih zavarova, praktički cijelo područje vrata tračnice ostaje neprovareno. Postojanje tako velikog diskontinuiteta u zavarenom spoju jako negativno utječe na njegova svojstva, napose dinamička. Drugo, na terenu je često otežan pristup pri zavarivanju vertikalnih kutnih zavarova koji povezuju ploču s vratom tračnice, pa je kvaliteta tih zavarova vrlo upitna. Osim toga, greške u zavarenom spoju se još mogu pojaviti zbog neuklonjenih korozijskih produkata na tračnici, lošeg nalijezanja umetne ploče na zavar nožice, velike količine zarobljene troske u zavaru nožice i sličnog [20].

#### ***4.1.2. Zavarivanje tračnica samozaštitnom praškom punjenom žicom***

Zbog navedenih nedostataka REL postupka, u primjenu se sve više uvodi nova tehnologija zavarivanja zagrebačkih tramvajskih tračnica. Ona podrazumijeva postupak zavarivanja samozaštitnom praškom punjenom žicom čije su se karakteristike pokazale vrlo prikladnom za zavarivanje tračnica. Među njima se posebno ističu velika količina nataljenog materijala u jedinici vremena i neosjetljivost na vjetar koji je uobičajen pri radu na terenu.

Nužna karakteristika opreme za zavarivanje tračnica je njena mobilnost. Oprema za ovaj postupak se sastoji od agregata Ranger 305D proizvođača Lincoln Electric prikazanog na slici 4.2, pripadajućeg dodavača žice, karakterističnog pištolja za zavarivanje ovim postupkom, magnetskog priključka mase te polikabela i drugih potrebnih kabela. Agregat se pokreće dizel motorom snage 14 kW što rezultira izlazom od 250 A i 30 V uz intermitenciju od 100 % [21].



Slika 4.2. Agregat za zavarivanje Ranger 305D [21]

Kako naziv postupka sugerira, kao dodatni materijal se koristi praškom punjena žica oznake EN ISO 17632-A: T 46 Z V N 3, Innershield NS 3ME, proizvođača Lincoln Electric. Žica je promjera 2 mm, a isporuči se u kolutima mase 6,35 kg. Prikladna je za zavarivanje u položajima PA i PB, a jedna od mogućih namjena je upravo zavarivanje tračnica. Zahtijeva zavarivanje istosmjernom strujom na plus polu. Kemijski sastav i uobičajena svojstva metala zavara s ovim dodatnim materijalom dana su u tablicama 4.1 i 4.2 [22].

Tablica 4.1. Kemijski sastav dodatnog materijala NS 3ME [22]

Kemijski simbol elementa	C	Mn	Si	P	S	Al
Maseni udio elementa, %	0,23	0,45	0,25	0,006	0,006	1,4

Tablica 4.2. Uobičajena mehanička svojstva zavara s dodatnim materijalom NS 3ME [22]

Granica razvlačenja, $R_e$ , N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća, $R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	Istezanje, $A$ , %
470	640	27

Kao i svi drugi, i ovaj postupak zahtijeva dobro očišćene i odmašćene površine koje trebaju biti zavarene. Tako se tračnice, nakon uobičajenog ručnog plinskog rezanja, iste, bruse i, koliko je moguće, poravnavaju pomoću kutne brusilice. Zatim se postavljaju suđeljene i „I“ pripremu spoja s razmakom od oko 20 mm. Problem s pozicioniranjem se može pojaviti kada je tračnica



neravno odrezana jer je tada nemogu e postići i optimalan zazor od 20 mm na svim dijelovima pripreme spoja. Na slici 4.3 je prikazan rez tra nica izveden ru nim plinskim postupkom.



Slika 4.3. Tra nica odrezana ru nim plinskim postupkom

Kako bi se kompenzirala neizbježna deformacija uslijed zavarivanja, tra nica se predeformiraju za kut od oko  $0,6^\circ$ . Taj kut predeformacije se određuje pomoću ravnala duljine 1 m tako da se ono prisloni na voznu površinu jedne tra nica te se tra nica podižu sve dok razmak između površine druge tra nica i kraja ravnala ne dosegne 5 mm. Postupak pozicioniranja tra nica i određivanja kuta predeformacije je prikazan na slici 4.4. Nakon što su tra nica konačno pozicionirane, ispod tra nica se postavlja bakrena podloška koja se učvršćuje vijcima i metalnim klinovima. Ta podloška ima utor koji se postavlja ispod pripremljenog spoja i tako oblikuje donji dio zavarivačke nožice.



Slika 4.4. Mjerenje kuta predeformacije tra nica pomoću ravnala

Zbog relativno visokog sadržaja ugljika i drugih legirnih elemenata, tra nice je, u pravilu, nužno predgrijavati. Osnovni cilj predgrijavanja je izbjegavanje nastanka martenzitne strukture usporenjem hla enja zone zavara i ZUT-a. Temperatura predgrijavanja prvenstveno ovisi o tra ni kom eliku, a za neke tra nice može dose i ak 500 °C. U ovom slu aju radi se o uglji no-manganskom eliku kvalitete R200 s perlitnom mikrostrukturom. Pri odre ivanju temperature predgrijavanja, osim sastava materijala koji je izražen u vrijednosti ekvivalenta ugljika, u obzir se uzimaju postupak i parametri zavarivanja (koji se o ituju kroz unos topline) te model hla enja. U ovom slu aju, zbog uporabe bakrenih obloga, pretpostavljeno je trodimenzionalno odvo enje topline. Uvažavaju i sve navedeno, odre ena temperatura predgrijavanja za konkretan slu aj iznosi 270 °C. Predgrijavanje treba biti jednoliko po cijelom presjeku tra nice i izvršeno u duljini od najmanje 200 mm od ruba. Mjerenje temperature se vrši pomo u infracrvenog termometra.

Kada su tra nice pozicionirane i predgrijane, slijedi njihovo pripajanje na rubovima nožice te zavarivanje. Kako bi se moglo pristupiti svim dijelovima tra nice prilikom zavarivanja, koristi se produžna kerami ka cjev ica. Prema slici 4.5, najprije se zavaruje nožica i to u nekoliko prolaza. Broj, smjer, duljina i redoslijed prolaza ovise o tehnici rada pojedinog zavariva a. Zadnji slojevi se izvode tako da su u ravnini ili ak malo ispod ravnine nožice tra nice kako bi se osiguralo dobro nalijeganje bakrenih obloga ije postavljanje slijedi nakon zavarene nožice. Obloge se u vrš uju elasti nom žicom kako prikazuje slika 4.6.



Slika 4.5. Zavarivanje nožice tra nice



Slika 4.6. Zavarivanje vrata tra nice uz uporabu bakrenih obloga

Nakon što su postavljene bakrene obloge, slijedi ponovno predgrijavanje plinskim plamenikom na propisanu temperaturu od 270 °C. Zavarivanje cjelokupnog vrata tra nice se izvodi bez prekida i traje oko 10 min. Ukoliko ipak dođe do izvanrednog prekida, uklanjaju se obloge, odstranjuje troska, ponovno postavljaju obloge te se tek tada nastavlja zavarivanje. Obloge ne naliježu uz tra nicu, nego na sebi imaju odstoynike koji osiguravaju zazor između tra nice i obloge, dovoljan da kroz njega može ići i troska. Prilikom zavarivanja donjeg dijela vrata, zavariva radi gotovo na slijepo što je posebno izraženo u slučaju malog zazora između tra nica. Zbog toga se u tom periodu nerijetko događaju kratki prekidi električnog luka. Visina do koje se izvodi zavarivanje bez prekida ovisi o tehnici rada pojedinog zavarivača, no najviše doseže nekoliko milimetara ispod dna žlijeba tra nice. Po završetku zavarivanja vrata slijedi iščepanje troske. Zatim slijedi nekoliko slojeva u donjem dijelu glave i vodicice.

Kada se dosegne dno žlijeba, u žlijeb se umetne još jedan bakreni kalup koji svojim oblikom osigurava formiranje zavariva u žlijebu. Zatim slijedi zavarivanje glave i vodicice. Vodicica se najviše zavaruje bez prekida dok se visina zavariva ne izjednači s gornjom površinom vodicice. Eventualno se dodaje još jedan završni sloj ako je potrebno. Kod glave to nije slučaj. Zavarivanje se prekida na otprilike  $\frac{3}{4}$  visine te se s nekoliko završnih prolaza (najviše 2 do 3) popunjava preostali volumen spoja i formira nadvišenje. Pri zavarivanju završnih slojeva mijenja se model odvođenja topline. Naime, uz gornji rub vozne površine je smanjen broj pravaca odvođenja topline. Ako se, k tome, uzme u obzir i da je tra nica već predgrijana zbog prethodnog zavarivanja, logična posljedica je značajno povišenje temperature gornjeg dijela glave tra nice. Zbog toga se



osnovni materijal intenzivno tali te nastaje karakteristično proširenje zavora u završnim slojevima. Zbog velike širine zavora, završni slojevi se ponekad izvedu u dva paralelna prolaza s relativno malim njihanjem ili u jednom prolazu s vrlo velikom amplitudom njihanja. Način izvedbe, također, ovisi o tehnici rada zavarivača.

Naposljetku se uklanjaju svi bakreni kalupi, isti se troska te se izvedu završni slojevi na nožici tračnice kojima se kvalitetnije povezuju zavar nožice sa zavarom vrata kako bi se izbjegli nagli prijelazi, odnosno koncentratori naprezanja. Još se izvedu jedan sloj na donjem dijelu žlijeba te, prema potrebi, dodatni popravni zavori na drugim dijelovima tračnice. Ti popravni zavori se najčešće odnose na popravak bočnice strana glave i vodilice i, u praksi, često izvedu REL postupkom. Na slici 4.7 je prikazan konačni izgled zavora prije mehaničke obrade.



Slika 4.7. Konačni izgled zavora tračnice prije brušenja

Nakon zavarivanja i hlađenja zavora na temperaturu ispod 100 °C slijedi brušenje nadvišenja na voznoj površini pomoću specijalne brusilice namijenjene za brušenje tračnice. Ostali dijelovi zavora (žlijeb i bočne površine glave i vodilice) bruse se kutnom brusilicom. Konačno se, već opisanom tehnikom, mjeri deformacija tračnice ukoliko ista postoji. Ukoliko je preostala deformacija unutar granica tolerancije, zavar tračnice je spreman za eksploataciju, a naknadni radovi koji slijede na kolosijeku više nisu vezani za zavarivanje.

Karakteristika ovog postupka je nastanak troske uslijed taljenja praška. Troska se, nakon svakog prolaza, uklanja pomoću pneumatskog čekića koji uvelike ubrzava i poboljšava proces uklanjanja.

Izgaranjem tog istog praška nastaju i plinovi koji su potrebni za zaštitu taline, no smanjuju ionako otežanu vidljivost posebice pri zavarivanju donjeg dijela vrata. Također, udisanje tih plinova može naštetiti zdravlju zavarivača pa se za odsis rabi poseban usisavač.

Postupak zavarivanja samozaštitnom praškom punjenom žicom se u primjenu počeo uvoditi tek prije nekoliko godina i to samo za zavare tračnice na ravnim dijelovima trase. Zavarivanje tračnica u skretnim i kim sklopovima i zavojima malog radijusa još uvijek se izvodi isključivo REL postupkom i pripadajućom, prethodno opisanom tehnologijom. Tehnologija zavarivanja koja podrazumijeva zavarivanje novim postupkom nije još u potpunosti uhodana, te se pojavljuje mnogo problema, odnosno „dijelova bolesti“ vezanih za tu tehnologiju. Ovaj rad je doprinos unaprjeđenju tehnologije zavarivanja samozaštitnom praškom punjenom žicom.

## 5. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu rada analizirana je postojeća tehnologija zavarivanja tramvajskih tračnica primjenom postupka zavarivanja samozaštitnom praškom punjenom žicom u poduzeću u Zagrebu – holding d.o.o. – podružnica ZET, odjel Održavanje tramvajske infrastrukture. Također je provedena i analizirana alternativna tehnologija u vidu varijacije temperature predgrijavanja i veličine zazora između tračnica. Dodatno je zavarovan jedan uzorak uz uporabu podložne čelične pločice čiji je cilj ušteda dodatnog materijala, a time i skraćivanje procesa zavarivanja nožice.

### 5.1. Izrada uzoraka

Za ispitivanje su odabrana dva segmenta tračnice kvalitete R200 u duljini od 18 m svaki. Velika duljina je odabrana kako bi se što preciznije simulirali realni uvjeti. Naime, odvođenje topline je znatno intenzivnije ako je tračnica duga, nego u slučaju kratkog segmenta duljine oko 50 cm kakvi se obično koriste za ispitivanja. Razlika u intenzitetu odvođenja topline posebno dolazi do izražaja u slučaju neadekvatnog predgrijavanja i predgrijavanja na relativno nisku temperaturu. Nakon dovršenog zavarivanja tračnica, ručnim plinskim postupkom je izrezan uzorak duljine oko 40 cm sa zavarom u sredini. Zatim su se preostali dijelovi tračnica primaknuli i pozicionirali tako da između novih „I“ spojeva te je uslijedilo zavarivanje sljedećeg uzorka. Radovi su izvođeni na otvorenom.

Sveukupno je izrađeno sedam uzoraka prema planu pokusa koji je dan u tablici 5.1. Uzorak broj 7 je specifičan po tome što je izrađen uz upotrebu podložne čelične pločice od konstrukcijskog materijala oznake S235 s dimenzijama  $180 \times 16 \times 3$  mm. Cilj pokusa je bio utvrditi moguća unaprjeđenja procesa u vidu uštede dodatnog materijala, skraćivanja vremena zavarivanja te smanjenja temperature predgrijavanja. Zavare su izvodili tri zavarivača označeni šiframa 1, 2 i 3. Uočene su značajne razlike u tehnici rada i parametrima zavarivanja između pojedinih zavarivača.

Prema uobičajenoj tehnologiji izrade, tračnice su predeformirane za mali kut kako je prethodno opisano. Nakon zavarivanja svih dijelova tračnice izuzev završnih slojeva, izmjerena je konačna deformacija. Cilj je bio utvrditi korelaciju između veličine zazora pripreme spoja i nastalog kuta deformacije. No, zbog nedovoljno precizno odrezanih tračnica nije bilo moguće jednoznačno odrediti veličinu zazora, a zbog neispravnog ravnala se nije mogao izmjeriti kut deformacije uz zadovoljavajuću točnost.

Tablica 5.1. Plan pokusa i oznake pojedinih uzoraka

		Veličina zavora između tračnica, mm		
		17	20	23
Temperatura predgrijavanja, °C	270	<b>Uzorak 1</b>	<b>Uzorak 3</b>	<b>Uzorak 6</b>
	100	<b>Uzorak 2</b>	<b>Uzorci 5 i 7</b>	<b>Uzorak 4</b>

### 5.1.1. Izrada uzorka 1

Zavarivanje nožice prvog uzorka je proteklo bez većih poteškoća i izvanrednih situacija. Napon električnog luka je iznosio 23,5 V, a brzina žice 3 m/min. Žica je spojena na plus pol istosmjernog struje. Nožica je zavarena u 4 sloja. Poteškoće su se pojavile pri zavarivanju vrata jer je zavor iznosio svega 14 mm nakon izvedenog zavora nožice. To je značajno otežalo kontrolu luka, odnosno manevriranje pištoljem. Uslijedila su dva neplanirana prekida zavarivanja koje su posljedice uočene vizualnom kontrolom. Vrat je zavaren uz napon 25 V i brzinu žice 3,5 m/min. Glava i vodilica su zavareni s istim parametrima uz nekoliko prekida električnog luka. Završni slojevi glave i vodilice su, bez poteškoća, izvedeni sa smanjenim parametrima, 24 V i 2,8 m/min.

### 5.1.2. Izrada uzorka 2

Nožica uzorka 2 je zavarena u 7 slojeva s naponom 25 V i brzinom žice 3,5 m/min. Žica je, prema odluci zavarivača, priključena na minus pol s ciljem smanjenja prekidanja luka. Prije pripajanja, u zavor između već pozicioniranih tračnica je postavljen elastični klin kako bi se spriječilo pomicanje tračnica uslijed toplinskih dilatacija, odnosno suženje ionako uskog zavora. To je izazvalo negativan efekt utoliko što su se zavarene tračnice deformirale u obrnutom smjeru od očekivanog. Konačni kut deformacije je bio značajno veći od onoga predeformiranog. Vrat i donji dijelovi glave i vodilice su zavareni bez poteškoća uz iste parametre. Parametri završnih slojeva su 22 V i 2,6 m/min.

### 5.1.3. Izrada uzorka 3

Prilikom zavarivanja nožice uočeno je dolazilo do prekida električnog luka, te se polaritet žice nekoliko puta mijenjao s nadom da će poteškoće minuti. Zavar nožice je izveden u 3 sloja s parametrima 24 V i 3 m/min. Pri zavarivanju donjeg i gornjeg dijela vrata je bilo dosta prekida luka što je sukladno s nalazom vizualne kontrole. Središnji dio je zavaren bez poteškoća. Donji

dijelovi vodilice i glave su izvedeni s parametrima 23,5 V i 3,2 m/min, a završni slojevi s 2,2 m/min uz isti napon.

#### **5.1.4. Izrada uzorka 4**

Zavarivanje uzorka 4 je proteklo bez poteškoća a osim svega nekoliko kapi kiše koje ipak nisu ugrozile zavarivačke radove niti utjecale na kvalitetu zavara. Zavarivanje nožice je provedeno uz isti napon i brzinu žice kao i kod uzorka 2, također sa žicom na minus polu. Vrat, glava i vodilica su izrađeni s 25 V i 3,2 m/min, a završni prolazi s 20,5 V i 2,6 m/min.

#### **5.1.5. Izrada uzorka 5**

Parametri pri zavarivanju uzorka 5 su bili 25 V i 3,5 m/min za sve dijelove tračnice osim za završne slojeve gdje su iznosili 20,5 V i 2,6 m/min. Svojstveno ovom zavarivaču, nožica je izvedena u 7 slojeva, a žica je priključena na minus pol.

#### **5.1.6. Izrada uzorka 6**

Zavarivanje ovog uzorka je proteklo s najviše poteškoća. Ustalili prekidi električnog luka su bili prisutni tijekom cjelokupnog izvođenja zavara. Primijenjena tehnika rada nije osiguravala otjecanje troske, nego je troska ostala zarobljena između metala zavara i tračnica. Nalazi nerazornih ispitivanja kao i makroizbrusci potvrđuju brojne greške i izrazito nepravilnu geometriju zavara. Zavarivanje je provedeno s naponom 25 V i brzinom žice 3,5 m/min, a završni prolazi s 20,5 V i 2,6 m/min.

#### **5.1.7. Izrada uzorka 7**

Specifičnost uzorka 7 je uporaba podložne eline pločice koja je umetnuta u otvor bakrene podloške. Zavarivanje je proteklo bez izvanrednih situacija s parametrima i tehnikom rada identičnim kao kod uzorka 5.

### **5.2. Nerazorna ispitivanja**

Izrađeni uzorci su prevezeni na Fakultet strojarstva i brodogradnje gdje je uslijedila njihova priprema za nerazorna ispitivanja. Uzorci su mehanički obrađeni elinom etkom, a eventualna zaostala troska je uklonjena zavarivačkim ekim. Uslijedila je vizualna kontrola kao prva u nizu nerazornih ispitivanja.

### 5.2.1. Vizualna kontrola







Prilikom vizualnog ispitivanja primijenjena je neposredna tehnika što znači da je vizualni pregled izvršen bez uporabe ikakvih pomagala kao što su zrcala, lupe i slično. Pri ispitivanju je posebna pažnja posvećena pridržavanju nužnih uvjeta ispitivanja. Osvjetljenost ispitne površine je iznosila više od zahtijevanih 500 lx, a udaljenost oka ispitivača do ispitne površine nije prelazila 600 mm.

Vizualna kontrola je provedena na svih sedam uzoraka. Zavar svakog uzorka je podijeljen u 11 segmenata, te je kontrola vršena zasebno za svaki segment. Izgledu svakog segmenta zavar je pridružena subjektivna ocjena s ciljem barem djelomične kvantifikacije rezultata. Valja naglasiti da su ocjene izrazito subjektivnog karaktera, a dodjeljivane su usporedbom pojedinog segmenta zavar s dva odabrana referentna segmenta zavar. Korištena skala je relativna, nikako apsolutna, te, kao takva, može poslužiti samo za međusobnu usporedbu uzoraka, odnosno segmenata zavar pojedinih uzoraka. Formirana je tako da je, među svim uzorcima, vizualno najlošijem segmentu zavar dodijeljena ocjena 1, a najboljem ocjena 10. Ostale ocjene su, kako je već spomenuto, dodjeljivane relativno u odnosu na ta dva referentna segmenta.






Osim dodjeljivanja ocjena, svaki od segmenata je fotografiran te su zapisana opažanja. Na vizualnoj površini, vratu i donjem dijelu nožice tražnice je, pomoću prikladnog mjernog alata, izmjereno nadvišenje zavar. Nadvišenje je mjereno u više točaka svakog segmenta, a zatim je izračunata prosječna vrijednost koja je upisana u tablici. Iznimno, u slučaju velikog odstupanja rezultata, upisan je raspon.

U tablicama 5.2 do 5.8 prikazana su opažanja, izmjerene vrijednosti, ocjene i fotografije segmenata zavar svih sedam uzoraka.

Tablica 5.2. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 1







Broj uzorka: 1		Šifra zavariva a: 1	Datum ispitivanja: 2. 6. 2015.
	Lijeva strana (na strani vodilice)	Desna strana (na strani glave)	
Nožica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nekoliko naštrcanih kapljica oko zavora</li> <li>• relativno glatka i uredna površina</li> <li>• 8/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• naštrcane kapljice oko zavora</li> <li>• nepravilan nastavak na završnom sloju</li> <li>• neuredan izgled površine</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	
Vrat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gruba i neuredna površina</li> <li>• neujednadena širina</li> <li>• izraženi prekidi zavarivanja</li> <li>• vrlo veliko nadvišenje (6,5 mm)</li> <li>• 3/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• curenje taline izme u obloge i tra nice pri dnu vrata</li> <li>• vrlo gruba i valovita površine</li> <li>• veliko nadvišenje (5,5 mm)</li> <li>• izražena dva prekida zavarivanja</li> <li>• 3/10</li> </ul> 	
Donji dio vodilice/glave	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gruba i valovita površina</li> <li>• izraženi pojedini slojevi zavarivanja</li> <li>• vidljiva zarobljena troska uz rubove zavora</li> <li>• mjestimi no prisutni površinski uklju ci bakra</li> <li>• 5/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gruba i neuredna površina zavora</li> <li>• izraženi prekidi zavarivanja</li> <li>• 4/10</li> </ul> 	








<p><b>Gornji dio vodilice/glave (vozna površina)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• završni sloj je zamaknut u lijevo u odnosu na ostatak zavora što rezultira nedovoljnom ispunom s desne strane</li> <li>• ostatak površine je gladak i uredan</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dio završnog sloja je zamaknut u odnosu na poprečni presjek</li> <li>• mjestimično prisutan nepotpun provar bridova tračnice</li> <li>• površina je izvanredno brušena zbog mjerenja deformacije</li> <li>• širina 26 mm</li> </ul> 
<p><b>Žlijeb</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gruba površina</li> <li>• izraženi pojedini slojevi zavarivanja</li> <li>• 5/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gruba površina zavora</li> <li>• vidljivi pojedini slojevi</li> <li>• 5/10</li> </ul> 
<p><b>Dno</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nepotpuni provar na središnjem dijelu</li> <li>• curenje taline na strani glave tračnice</li> <li>• izražen prekid zavarivanja na strani vodilice</li> <li>• prosječno nadvišenje 4,2 mm, prosječna širina 17 mm</li> <li>• 4/10</li> </ul> 	









Tablica 5.3. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 2






Broj uzorka: 2		Šifra zavariva a: 2		Datum ispitivanja: 2. 6. 2015.	
		Lijeva strana (na strani vodilice)		Desna strana (na strani glave)	
Nožica	<ul style="list-style-type: none"><li>• uredna površina</li><li>• nedostatan nadvišenje (nedostaje zadnji sloj)</li><li>• vidljive naštrcane kapljice oko zavora</li><li>• 8/10</li></ul> 		<ul style="list-style-type: none"><li>• relativno glatka i uredna površina izuzev završetka zavora uz rub nožice</li><li>• nedovoljno nadvišenje zavora</li><li>• prisutne naštrcane kapljice oko zavora</li><li>• 7/10</li></ul> 		
	<ul style="list-style-type: none"><li>• vrlo veliko nadvišenje (oko 10 mm)</li><li>• curenje taline na bokovima zavora</li><li>• površina zavora nepravilnog oblika</li><li>• 4/10</li></ul> 		<ul style="list-style-type: none"><li>• relativno glatka i uredna površina</li><li>• nadvišenje se pove ava od nožice prema glavi (3-5 mm) zbog, najvjerojatnije, pomicanja bakrene obloge</li><li>• 8/10</li></ul> 		
Donji dio vodilice/glave	<ul style="list-style-type: none"><li>• glatka površina</li><li>• pojedini slojevi nisu jako izraženi</li><li>• manja koli ina površinskih uklju aka bakra</li><li>• 9/10</li></ul> 		<ul style="list-style-type: none"><li>• gruba površina s jako izraženim slojevima zavora i ugorinama</li><li>• veliko nadvišenje</li><li>• velika koli ina površinskih uklju aka bakra</li><li>• 3/10</li></ul> 		

<b>Gornji dio vodilice/glave (vozna površina)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nedovoljno nadvišenje zavora (nedostaje završni prolaz)</li> <li>• prisutne ugorine</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• glatka i ravna površina</li> <li>• nedovoljno nadvišenje na strani žlijeba</li> <li>• prisutne naštrcane kapljice oko zavora</li> <li>• nadvišenje 0-2 mm, širina 33 mm</li> <li>• 8/10</li> </ul> 
<b>Žlijeb</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• površina je zadovoljavajućeg izgleda iako su mjestimično izraženi pojedini slojevi zavora</li> <li>• 7/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vidljivi uključci troske po rubu zavora</li> <li>• gruba i neuredna površina</li> <li>• nedovoljna ispunjena na mjestima prekida zavarivanja</li> <li>• 5/10</li> </ul> 
<b>Dno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gruba površina</li> <li>• vidljivi uključci troske po rubovima</li> <li>• nadvišenje i širina zavora se kreću od 4 mm odnosno 15 mm na strani vodilice do 6 mm odnosno 24 mm na strani glave tračnice</li> <li>• 4/10</li> </ul> 	







Tablica 5.4. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 3






Broj uzorka: 3		Šifra zavariva a: 1	Datum ispitivanja: 2. 6. 2015.
	Lijeva strana (na strani vodilice)	Desna strana (na strani glave)	
Nožica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• prisutne naštrecane kapljice oko zavora</li> <li>• nedovoljno nadvišenje, nedostaje završni prolaz</li> <li>• nepravilan spoj sa zavarom vrata</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dio površine je brušen zbog prevelikog nadvišenja zavora koje je onemogućilo postavljanje bakrenih obloga</li> <li>• vidljivo smaknuće nožica dviju stranica uslijed nepreciznog pozicioniranja prije zavarivanja</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	
Vrat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gruba površina</li> <li>• curenje taline po bokovima</li> <li>• nadvišenje 5 mm, a širina u rasponu od 28 mm do 35 mm</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• površina nepravilnog oblika</li> <li>• nedovoljno staljivanje na rubovima kod nožice</li> <li>• nadvišenje 4,5 mm</li> <li>• 5/10</li> </ul> 	
Donji dio vodilice/glave	<ul style="list-style-type: none"> <li>• izražen diskontinuitet zavora</li> <li>• gruba površina nepravilnog izgleda</li> <li>• 7/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• izraženi pojedini slojevi kao i nastavak na zavar vrata</li> <li>• vidljivi uključci troske i bakra</li> <li>• 4/10</li> </ul> 	



<b>Gornji dio vodilice/glave (vozna površina)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• izraženi slojevi zavara</li> <li>• nedovoljno nadvišenje jer nedostaje završni prolaz</li> <li>• vidljive male ugorine</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• manja količina naštrcanih kapljica oko zavara</li> <li>• izražena dva paralelna prolaza s malim njihanjem</li> <li>• nadvišenje 3 mm, širina 27 mm</li> <li>• 8/10</li> </ul> 
<b>Žlijeb</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• otvorena pora pri dnu žlijeba</li> <li>• glatka površina</li> <li>• 7/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• izraženiji diskontinuiteti zavara</li> <li>• nedovoljna ispuna (neprovar) između slojeva</li> <li>• 4/10</li> </ul> 
<b>Dno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jako izraženo curenje taline uz rub na strani vodilice</li> <li>• gruba površina</li> <li>• dva jako izražena diskontinuiteta zavara</li> <li>• nadvišenje 5,5 mm, širina 26 mm</li> <li>• 4/10</li> </ul> 	







Tablica 5.5. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 4






Broj uzorka: 4		Šifra zavariva a: 2	Datum ispitivanja: 3. 6. 2015.
	Lijeva strana (na strani vodilice)	Desna strana (na strani glave)	
Nožica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• glatka i uredna površina</li> <li>• jedan završni prolaz s njihanjem</li> <li>• ve a koli ina naštrcanih kapljica</li> <li>• 9/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• uredna i glatka površina na injena u jednom završnom prolazu</li> <li>• mala koli ina naštrcanih kapljica</li> <li>• 9/10</li> </ul> 	
Vrat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• glatka i uredna površina</li> <li>• slojevi me usobno dobro povezani</li> <li>• nadvišenje 5 mm, širina 35 mm</li> <li>• 9/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• glatka i uredna površina</li> <li>• slojevi me usobno dobro povezani</li> <li>• nadvišenje 4,5 mm, širina 35 mm</li> <li>• 9/10</li> </ul> 	
Donji dio vodilice/glave	<ul style="list-style-type: none"> <li>• relativno dobro povezani prolazi bez jako izraženih diskontinuiteta</li> <li>• velika koli ina površinskih uklju aka bakra</li> <li>• 7/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• diskontinuiteti zavara izme u pojedinim slojeva</li> <li>• veliko nadvišenje</li> <li>• velika koli ina površinskih uklju aka bakra</li> <li>• 3/10</li> </ul> 	

<p><b>Gornji dio vodilice/glave (vozna površina)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• glatka površina s dobro povezanim slojevima</li> <li>• prisutne male ugorine s jedne strane zavara</li> <li>• 8/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• glatka i uredna površina</li> <li>• naštrcane kapljice oko zavara</li> <li>• nedovoljno nadvišenje, nedostaje jedan sloj</li> <li>• nadvišenje 0-2 mm, širina 30-35 mm</li> <li>• 8/10</li> </ul> 
<p><b>Žlijeb</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• površina relativno uredna izuzev jednog izraženog diskontinuiteta</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• neuredna i gruba površina</li> <li>• izraženi diskontinuiteti zavara s nedovoljnom ispunom (neprovarom)</li> <li>• 3/10</li> </ul> 
<p><b>Dno</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ujedna ena širina i nadvišenje</li> <li>• manja koli ina površinskih uklju aka bakra</li> <li>• nadvišenje 5,5 mm, širina 29 mm</li> <li>• 7/10</li> </ul> 	









Tablica 5.6. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 5






Broj uzorka: 5		Šifra zavariva a: 2	Datum ispitivanja: 3. 6. 2015.
	Lijeva strana (na strani vodilice)	Desna strana (na strani glave)	
Nožica	<ul style="list-style-type: none"> <li>relativno glatka površina ujedna enog nadvišenja</li> <li>prisutne naštrcane kapljice oko zavora</li> <li>8/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>blago gruba površina s izraženim tragovima njihanja luka</li> <li>naštrcane kapljice</li> <li>nedovoljna ispuna uz desni rub</li> <li>7/10</li> </ul> 	
Vrat	<ul style="list-style-type: none"> <li>ujedna ena širina i nadvišenje</li> <li>glatka površina bez diskontinuiteta</li> <li>nadvišenje 5 mm, širina 32 mm</li> <li>10/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>uredna i glatka površina osim jednog izraženog diskontinuiteta</li> <li>ujedna eno nadvišenje u iznosu 4 mm kao i širina od 32 mm</li> <li>8/10</li> </ul> 	
Donji dio vodilice/glave	<ul style="list-style-type: none"> <li>relativno glatka i ujedna ena površina s dobro povezanim slojevima</li> <li>mala koli ina površinskih uklju aka bakra</li> <li>8/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>jako izraženi diskontinuiteti izme u slojeva, nepotpun provar</li> <li>velika koli ina površinskih uklju aka bakra</li> <li>3/10</li> </ul> 	

<p><b>Gornji dio vodilice/glave (vozna površina)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nedovoljna ispuna (nedostaje završni prolaz)</li> <li>• prisutne male ugorine</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• glatka površina izvedena u jednom završnom prolazu s njihanjem</li> <li>• mala količina nastrcanih kapljica</li> <li>• nedovoljno nadvišenje (nedostaj završni prolaz)</li> <li>• nadvišenje 1 mm, širina 34 mm</li> <li>• 8/10</li> </ul> 
<p><b>Žlijeb</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• relativno ujednaena širina</li> <li>• vidljivi diskontinuiteti zavora</li> <li>• 7/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gruba površina s izraženim diskontinuitetima zavora</li> <li>• 5/10</li> </ul> 
<p><b>Dno</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• relativno glatka i ujednaena površina s ujednaenim nadvišenjem (5 mm) i širinom (28 mm)</li> <li>• 7/10</li> </ul> 	









Tablica 5.7. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 6






Broj uzorka: 6		Šifra zavariva a: 3	Datum ispitivanja: 8. 6. 2015.	
	Lijeva strana (na strani vodilice)		Desna strana (na strani glave)	
Nožica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• neuredan izgled završnog prolaza</li> <li>• vidljiva zarobljena troska uz rub zavora</li> <li>• naštrcane kapljice oko zavora</li> <li>• 3/10</li> </ul> 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• gruba površina s neujednačnim nadvišenjem</li> <li>• naštrcane kapljice</li> <li>• ugorine uz rub zavora</li> <li>• 5/10</li> </ul> 	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• glatka površina</li> <li>• ujednačeno nadvišenje (5 mm), širina 30-35 mm</li> <li>• dobro povezani slojevi</li> <li>• 8/10</li> </ul> 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• zarobljena troska uz nožicu</li> <li>• glatka površina, dobro povezani prolazi osim u gornjem dijelu kod glave tračnice</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	
Donji dio vodilice/glave	<ul style="list-style-type: none"> <li>• neuredna površina s ugorinama i nepotpunim provarom bridova</li> <li>• prisutni uključci bakra</li> <li>• 3/10</li> </ul> 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• velika količina površinskih uključaka bakra</li> <li>• nepotpun provar bridova</li> <li>• izraženi diskontinuiteti zavora</li> <li>• 3/10</li> </ul> 	

<p><b>Gornji dio vodilice/glave (vozna površina)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nedovoljno nadvišenje</li> <li>• prisutne ugorine</li> <li>• 4/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• relativno glatka površina</li> <li>• nedovoljno nadvišenje</li> <li>• prisutne male ugorine</li> <li>• nadvišenje 0-1 mm, širina 30-35 mm</li> <li>• 6/10</li> </ul> 
<p><b>Žlijeb</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zarobljena troska po rubovima</li> <li>• relativno uredna površina s dobro povezanim slojevima</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• loše povezani prolazi</li> <li>• nepotpun provar bridova</li> <li>• zarobljena troska</li> <li>• 1/10</li> </ul> 
<p><b>Dno</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• izrazito gruba površina s estim curenjem taline po bokovima</li> <li>• velika količina zarobljene troske po rubu zavora</li> <li>• prisutni uključci bakra</li> <li>• 2/10</li> </ul> 	

Tablica 5.8. Nalaz vizualnog ispitivanja uzorka 7

Broj uzorka: 7		Šifra zavariva a: 2	Datum ispitivanja: 8. 6. 2015.
	Lijeva strana (na strani vodilice)	Desna strana (na strani glave)	
Nožica	<ul style="list-style-type: none"> <li>uredna površina s ujedna enim nadvišenjem</li> <li>prisutne naštrcane kapljice</li> <li>7/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>naštrcane kapljice</li> <li>vidljiva otvorena pora s lijeve strane</li> <li>6/10</li> </ul> 	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>glatka i uredna površina</li> <li>ujedna ena širina (31 mm) i nadvišenje (5 mm)</li> <li>9/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>glatka i uredna površina izuzev jednog diskontinuiteta kod glave tra nice</li> <li>ujedna ena širina (31 mm) i nadvišenje (3,5 mm)</li> <li>8/10</li> </ul> 	
Donji dio vodilice/glave	<ul style="list-style-type: none"> <li>ve a koli ina uklju aka bakra</li> <li>pri vrhu je izražen diskontinuitet zavora s vidljivom zarobljenom troskom</li> <li>5/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>prisutni uklju ci bakra</li> <li>pri vrhu loše povezani slojevi s izraženim udubinama u zavaru</li> <li>5/10</li> </ul> 	



Gornji dio vodilice/glave (vozna površina)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• prisutne ugorine</li> <li>• nedovoljna ispuna – površina zavora je ispod površine vodilice</li> <li>• 6/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ujedna ena širina i nadvišenje</li> <li>• nedostaje završni prolaz</li> <li>• glatka i uredna površina</li> <li>• nadvišenje 0-0,5 mm, širina 31 mm</li> <li>• 9/10</li> </ul> 
Žlijeb	<ul style="list-style-type: none"> <li>• uredna i glatka površina izuzev jednog izraženog diskontinuiteta</li> <li>• dobro povezani slojevi</li> <li>• 8/10</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vrlo gruba površina</li> <li>• ostaci nerastaljene žice</li> <li>• jako loše povezani slojevi</li> <li>• 1/10</li> </ul> 
Dno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nedovoljno protaljeni bridovi tra nice kao i umetnuta podložna eli na plo ica</li> <li>• zarobljena troska uz rub plo ice</li> <li>• nadvišenje zavora na mjestima potpunog protaljivanja iznosi 5,5 mm, a na mjestu neprotaljene plo ice 4 mm, širina iznosi oko 23 mm</li> </ul> 	

Nakon provedene vizualne kontrole izra unat je prosjek ocjena pojedinih segmenata s ciljem utvrđivanja uobičajeno vizualno najlošijih mjesta zavora. Prosjek ocjena po segmentima je dan u tablici 5.9. Iz izra unatih prosjeka vidljivo je da su ocjene znatno niže za donji dio vodilice odnosno glave, žlijeb i dno tračnice. Navedeni segmenti su ostavili najlošiji vizualni dojam.

Tablica 5.9. Procjek ocjena pojedinih segmenata zavora

Segment zavora	Nožica	Vrat	Donji dio vodilice/glave	Gornji dio vodilice/glave	Žlijeb	Dno
Prosječna ocjena	6,8	6,9	4,9	6,8	5	4,7

Uoeno je da se na pojedinim segmentima odreene greške ponavljaju. Tako su karakteristične greške za dno tračnice gruba i nepravilna površina te ukljućeni bakra i troske po rubu zavora. Kod zavora u žlijebu se redovito pojavljuju diskontinuiteti zbog lošeg povezivanja pojedinih slojeva, nepotpun provar bridova žlijeba te, mjestimično, zaostala troska. Najčešće greške u donjem dijelu vodilice odnosno glave tračnice je velika količina ukljućenog bakra, nepravilna površina s izraženim diskontinuitetima zavora te nepotpun provar bridova s ukljućenim troskama. Zavarivanja vrata tračnice karakteriziraju relativno veliko nadvišenje i širina što izaziva velik utrošak dodatnog materijala, a time i vremena potrebnog za zavarivanje vrata.

### 5.2.2. Ultrazvučno ispitivanje

Za ispitivanje ultrazvukom bilo je potrebno ukloniti nadvišenje zavora na glavi, vodilici i žlijebu kako bi se postigla koliko-toliko pravilna geometrija i time omogućilo ispitivanje. To je izvedeno kutnom brusilicom u poduzeću ZET. Nužna je bila i dodatna mehanička priprema uzoraka kako bi se osiguralo dobro nalijezanje ispitne sonde. U širem području oko zavora je trebalo ukloniti produkte korozije i naštrcane kapljice, a da se pri tome ne ošteti površina zavora na vratu i nožici. Kao najprikladniji alat odabrana je električna četka priključena na električnu kutnu brusilicu kako prikazuje slika 5.1.



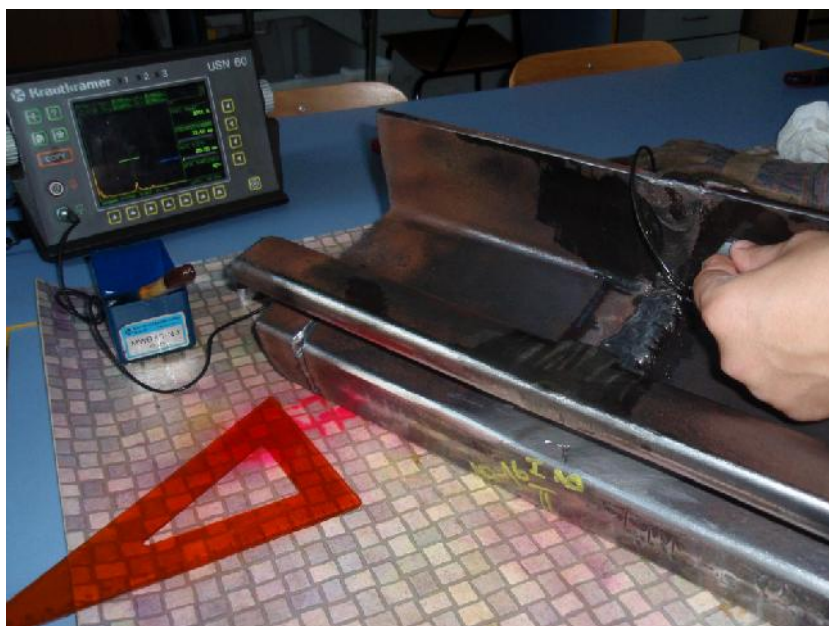
Slika 5.1. Dodatno mehaničkočišćenje uzoraka

Ultrazvučno ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja na uzorcima 3, 4, 5 i 6. Kako bi se smanjio obim ispitivanja, iz analize su izbaćeni uzorci 1 i 2 zbog izrazito lošeg vizualnog dojma, a stanje pokusa uzorka 7 je, praktički, identično onome kod uzorka 5, pa

ispitivanje nije potrebno. Zbog ograničenja uzrokovanih složenom geometrijom tračnice s malim radiusima zakrivljenosti, ispitivanje nije bilo moguće provesti u predjelu vodilice, žlijeba i dijela glave tračnice. Korišteni uređaji i parametri ispitivanja su dani u tablici 5.10, a tijek ispitivanja prikazuje slika 5.2.

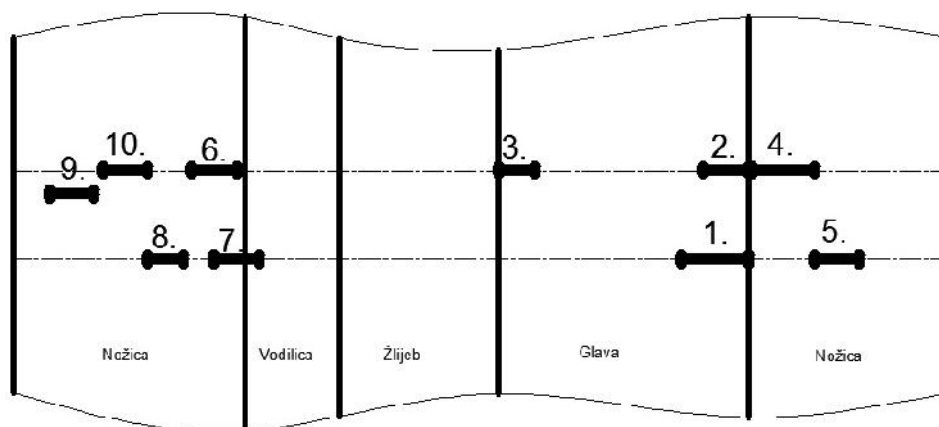
Tablica 5.10. Oprema i parametri ultrazvučnog ispitivanja

Uređaj / serijski broj:	USN 60 / 00X3P0
Sonda:	MWB-70 / MWB-60 / MSEB 4
Kabel:	MPKL-2
Kontaktno sredstvo:	Ulje
Referentni etalon:	V2
Referentni reflektor:	R50
Mjerno područje:	100-300 mm
Ispitna frekvencija:	4 MHz
Visina referentne amplitude:	80%
Procjena veličine:	Ø2 mm ADR
Ref. pojačanje:	42 dB
Rad. pojačanje:	68 dB



Slika 5.2. Ultrazvučno ispitivanje uzoraka

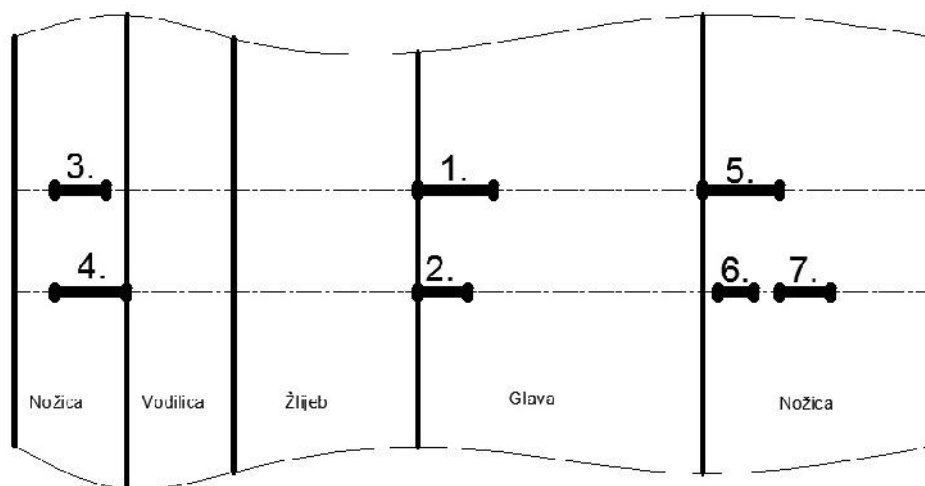
Ispitivanjem utvrđene indikacije su numerirane i obilježene na uzorcima te ucrtane na tlocrtu tračnice kako prikazuju slike 5.3 do 5.6. Za svaku indikaciju su, koliko je bilo moguće, određeni oblik, veličina i položaj navedeni u tablicama 5.11 do 5.14. Indikacije na vratu tračnice nisu prikazane na skicama, no sve se nalaze u donjem dijelu vrata, tik uz nožicu. Duljina indikacije je označena s  $l$ , a dubina na kojoj je refleksija ultrazvučnog signala najjača je označena s  $d$ .



Slika 5.3. Indikacije na uzorku 3

Tablica 5.11. Pozicija, dimenzije i opis indikacija na uzorku 3

Broj indikacije	Pozicija	Duljina $l$ , mm	Dubina $d$ , mm	Opis
1.	glava	30	13	uzdužna indikacija
2.	glava	10	10	uzdužna indikacija
3.	glava	5	10	uzdužna indikacija
4.	nožica	10	5	uzdužna indikacija
5.	nožica	40	4	uzdužna indikacija
6.	nožica	5	5	uzdužna indikacija
7.	nožica	5	6	uzdužna indikacija
8.	nožica	10	5	uzdužna indikacija
9.	nožica	5	4	uzdužna indikacija
10.	nožica	10	5	uzdužna indikacija
11.	vrat	10	-	uzdužna indikacija
12.	vrat	15	-	uzdužna indikacija

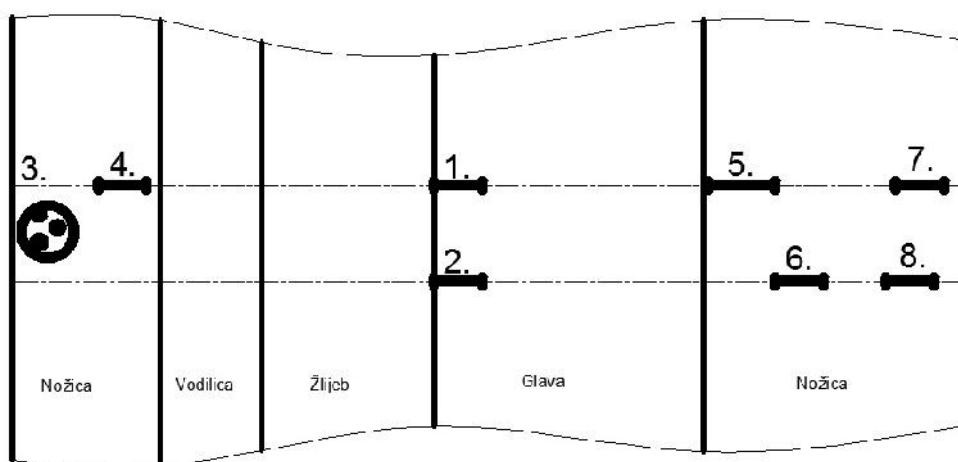


Slika 5.4. Indikacije na uzorku 4

Tablica 5.12. Pozicija, dimenzije i opis indikacija na uzorku 4

Broj indikacije	Pozicija	Duljina $l$ , mm	Dubina $d$ , mm	Opis
1.	glava	25	25	uzdužna indikacija
2.	glava	15	28	uzdužna indikacija
3.	nožica	30	5	uzdužna indikacija
4.	nožica	45	5	uzdužna indikacija
5.	nožica	45	5	uzdužna indikacija
6.	nožica	10	5	uzdužna indikacija
7.	nožica	10	5	uzdužna indikacija

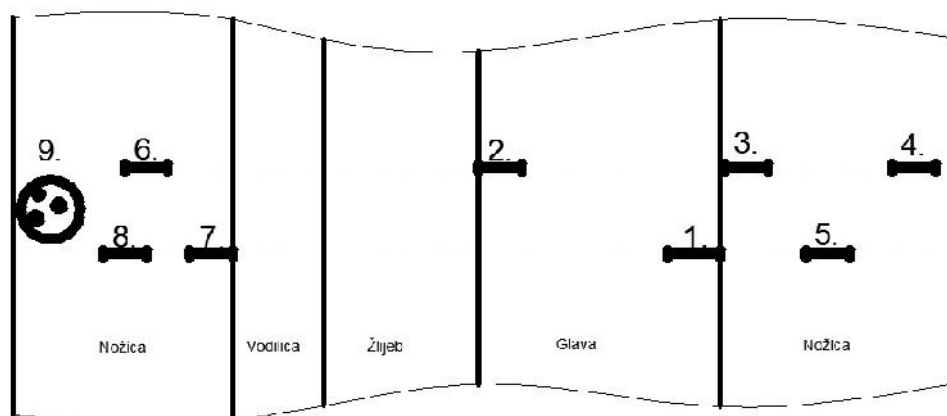




Slika 5.5. Indikacije na uzorku 5

Tablica 5.13. Pozicija, dimenzije i opis indikacija na uzorku 5

Broj indikacije	Pozicija	Duljina $l$ , mm	Dubina $d$ , mm	Opis
1.	glava	15	14	uzdužna indikacija
2.	glava	10	15	uzdužna indikacija
3.	nožica	-	-	to kaste indikacije
4.	nožica	45	5	uzdužna indikacija
5.	nožica	10	5	uzdužna indikacija
6.	nožica	5	7	uzdužna indikacija
7.	nožica	5	5	uzdužna indikacija
8.	nožica	10	1-8	uzdužna indikacija
9.	vrat	10	0-5	uzdužna indikacija



Slika 5.6. Indikacije na uzorku 6

Tablica 5.14. Pozicija, dimenzije i opis indikacija na uzorku 6

Broj indikacije	Pozicija	Duljina $l$ , mm	Dubina $d$ , mm	Opis
1.	glava	30	25	uzdužna indikacija
2.	glava	10	5	uzdužna indikacija
3.	nožica	10	5	uzdužna indikacija
4.	nožica	30	2-5	uzdužna indikacija
5.	nožica	5	10	uzdužna indikacija
6.	nožica	15	5	uzdužna indikacija
7.	nožica	10	5	uzdužna indikacija
8.	nožica	10	5	uzdužna indikacija
9.	nožica	-	-	to kaste indikacije
10.	vrat	5	5	uzdužna indikacija

### 5.2.3. Radiografsko ispitivanje

Kako bi se potvrdili i nadopunili nalazi ultrazvu nog ispitivanja, provedeno je ispitivanje radiografskom metodom, tako er u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja u posebno zašt enoj komori za radiografsko ispitivanje. Snimanje je izvršeno pomo u digitalnog filma što je rezultiralo radiogramom u digitalnom obliku. To je omogu ilo naknadnu korekciju zacrnjenja i primjenu razli itih filtera kako bi se indikacije što bolje istaknule. Detaljno su ispitani zavari nožice i vrata tra nice. Zavar glave je tako er snimljen no, zbog velike promjene debljine i nepravilne

geometrije, indikacije na nekim uzorcima su teško uočljive. Prikaz i popis ispitne opreme dan je u tablici 5.15 odnosno na slici 5.7, a parametri ispitivanja u tablici 5.16.

Tablica 5.15. Oprema radiografskog ispitivanja

RTG uređaj:	Balteau GM 300D
Skener:	VMI 3600 SF
Slikovna ploča:	Kodak, GP, 3,5x10"
Pojačivačka folija:	olovo, 0,1 mm

Tablica 5.16. Parametri radiografskog ispitivanja po dijelovima tračnice

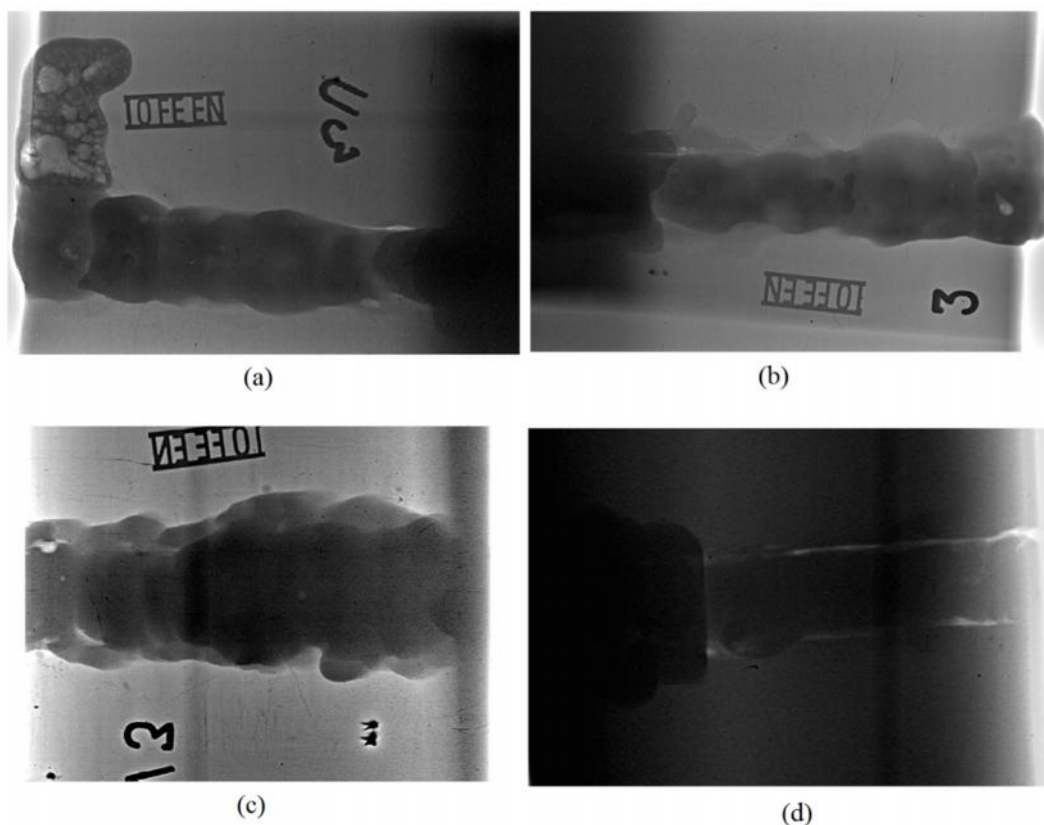
Parametar	Glava	Vrat	Nožica
Napon cijevi, kV	275	175	175
Struja, mA	4	4	4
Vrijeme ekspozicije, min	3	1,25	1,3



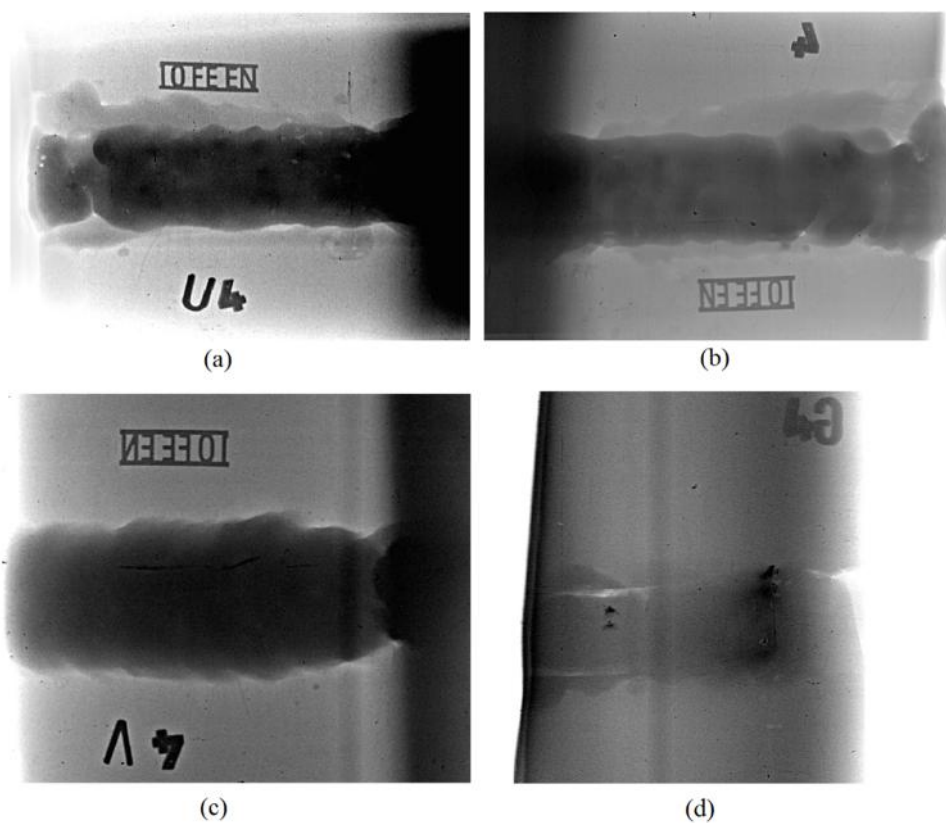
Slika 5.7. Radiografsko ispitivanje uzoraka

Obrađeni radiogrami dijelova zavora su prikazani na slikama 5.8 do 5.11. Radiogrami se odnose na određene dijelove zavora na slijedeći način:

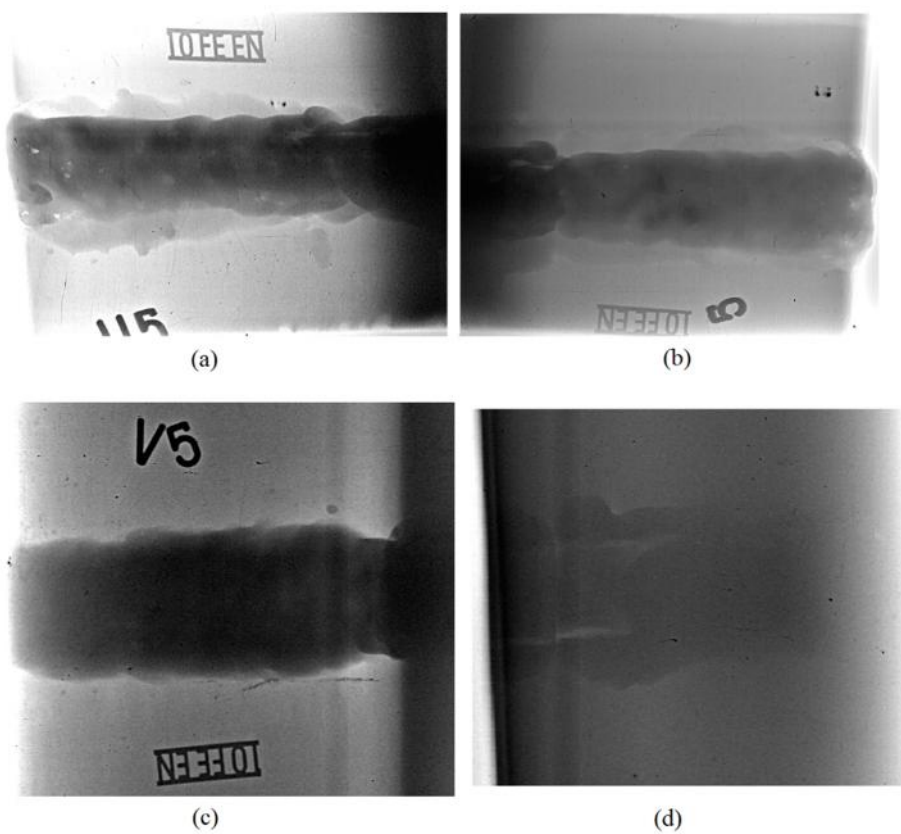
- (a) – dio nožice tračnice na strani vodilice (lijeva strana radiograma prikazuje dio nožice uz vrat)
- (b) – dio nožice tračnice na strani glave (desna strana radiograma prikazuje dio nožice uz vrat)
- (c) – vrat tračnice (donji dio uz nožicu je s desne strane radiograma)
- (d) – glava tračnice (lijeva strana radiograma prikazuje dio glave uz žlijeb tračnice).



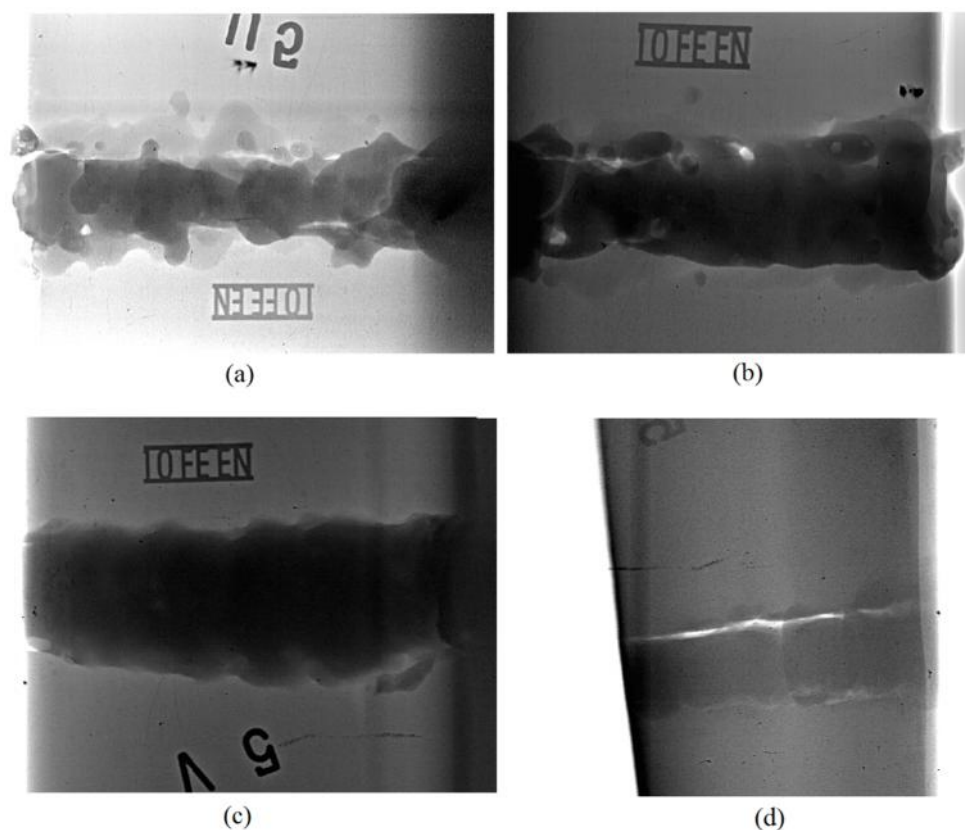
Slika 5.8. Radiogrami dijelova zavora tračnice uzorka 3



Slika 5.9. Radiogrami dijelova zavora tra nice uzorka 4



Slika 5.10. Radiogrami dijelova zavora tra nice uzorka 5



Slika 5.11. Radiogrami dijelova zavora tra nice uzorka 6

Na prikazanim radiogramima uzorka 3 može se uočiti nekoliko uzdužnih indikacija u predjelu nožice, no ipak ne onoliko koliko pokazuje rezultat ispitivanja ultrazvukom. Oblik, položaj i veličina indikacija u donjem dijelu vrata i u glavi tra nice u potpunosti odgovara nalazu ultrazvuka.

Radiogrami nožice uzorka 4 dodatno otkrivaju točkaste indikacije na rubu dijela nožice sa strane vodilice, no ipak neke indikacije otkrivene ultrazvukom ne prikazuju dovoljno jasno. Potvrđeno je da se u zavaru vrata ne nalaze indikacije te da su u glavi prisutne dvije duge nepravilnosti uz rub zavora.

Radiogrami nožice uzorka 5 u potpunosti potvrđuju sve indikacije ultrazvukom nalaza, ali tek kada su detaljno pregledani uz različita zacrtnjenja. Na prikazanom radiogramu je indikacija broj 4 gotovo nevidljiva iako je duga čak 45 mm. Osim toga, dodatno su otkrivene točkaste indikacije uz rub dijela nožice sa strane glave. Na vratu nije vidljiva indikacija broj 9. Radiogram glave je sukladan nalazu ultrazvuka iako su indikacije teško uočljive zbog slabog kontrasta.

Rezultati ispitivanja uzorka 6 dobiveni pomoću dviju spomenutih volumetrijskih nerazornih metoda se preklapaju u potpunosti unatoč velikom broju indikacija i izrazito nepravilnoj geometriji zavora.



#### 5.2.4. Analiza rezultata nerazornih ispitivanja

Promatraju i rezultate svih triju nerazornih ispitivanja, može se uočiti vrlo dobro preklapanje ultrazvučnih i radiografskih nalaza. Na temelju vizualne kontrole su se mogle pretpostaviti indikacije u nekim dijelovima, no ipak ne sve. Kao primjer mogu poslužiti vrlo duge indikacije uz rub zavarova nožice i glave tračnice. Vodicica i dio glave sa žlijebom nisu ispitani volumetrijskim metodama, ali na temelju vizualnog pregleda se može sa sigurnošću ustvrditi da gotovo svi uzorci imaju nepravilnosti u tim dijelovima.

Proces zavarivanja svih uzoraka je pomno praćen i detaljno fotografiran u svim fazama izrade. Sve relevantne pojedinosti procesa su zapisane, a dio njih je naveden i u ovom radu. Analizom tih podataka i fotografija te njihovom usporedbom s dobivenim rezultatima ispitivanja, dobiva se vrlo jasna slika o nepravilnostima koje se nalaze u zavarima. Praktički sve uzdužne indikacije po rubu zavarova su odziv od zarobljene troske kako je vidljivo na slici 5.12, a to kaste indikacije ukazuju na pore, tj. gnijezdo pora. Mjestimično, u kombinaciji sa zaostalom troskom, se može naći i greška naljepljivanja. Osim toga, greške zaostale troske i neprovara se mogu prepoznati i u okruglastom obliku, kao šupljine i uključci troske vrlo oštih vrhova i bridova.



Slika 5.12. Zavar u fazi izrade (uzorak 6) s velikom količinom zaostale troske po rubovima

#### 5.3. Razorna ispitivanja

Kako bi se odredila mehanička svojstva zavarova bilo je nužno provesti razorna ispitivanja koja su obuhvaćala mjerenje tvrdoće i statički vlačni pokus. Na temelju raspodjele tvrdoće po zonama zavarenog spoja, može se zaključiti o nastaloj mikrostrukturi. Mikrostruktura ovisi u pojedinim

zonama zavora govori o utjecaju parametara zavarivanja, odnosno, u ovom slučaju, o utjecaju temperature predgrijavanja.

### 5.3.1. Priprema makroizbrusaka i epruveta

Po završetku nerazornih ispitivanja uslijedila je priprema uzoraka za izradu makroizbrusaka i ispitivanje mehaničkih svojstava zavora. Uzorci su najprije izrezani automatiziranim plinskim postupkom u Laboratoriju za zavarivanje kako prikazuje slika 5.13. Za izradu makroizbrusaka izrezani su segmenti iz glave, vrata i nožice, s tim da je iz vrata tražnice dodatno izrezan segment za izradu epruvete za statički vlačni pokus. Na svim segmentima su na nekoliko mjesta utisnute oznake kako ne bi došlo do njihove zamjene.



Slika 5.13. Rezanje uzoraka automatiziranim plinskim postupkom

Uslijedilo je izrezivanje makroizbrusaka na tražnoj pili. Tu su nastupili problemi zbog relativno visoke tvrdoće materijala i velikog sadržaja neistosti (prvenstveno troske) koje su uzrokovale brzo zatupljenje pile. Kako adekvatna pila nije bila dostupna, rezanje je odrađeno u poduzeću u Monter – strojarске montaže d.d. Za rezanje glave, umjesto tražne pile i zbog istih problema, korištena je ručna kutna brusilica s reznom plohom. Zbog vrlo neravnog reza, prije brušenja je bilo nužno blanjanje ispitne površine koje je izvršeno u Laboratoriju za alatne strojeve. Ispitna površina je zatim brušena najprije brusnom plohom, a zatim brusnim papirima poevši od granulacije P150 do završnog brušenja s P2000 kako je prikazano na slici 5.14. Posljednja faza pripreme je bila nagrizanje ispitne površine u 3-postotnom nitalu<sup>1</sup> u trajanju od 10 sekundi, a izvršena je u Laboratoriju za zaštitu materijala.

<sup>1</sup> otopina dušične kiseline (3%) u metanolu (97%)





Slika 5.14. Brušenje makroizbrusaka brusnim papirom

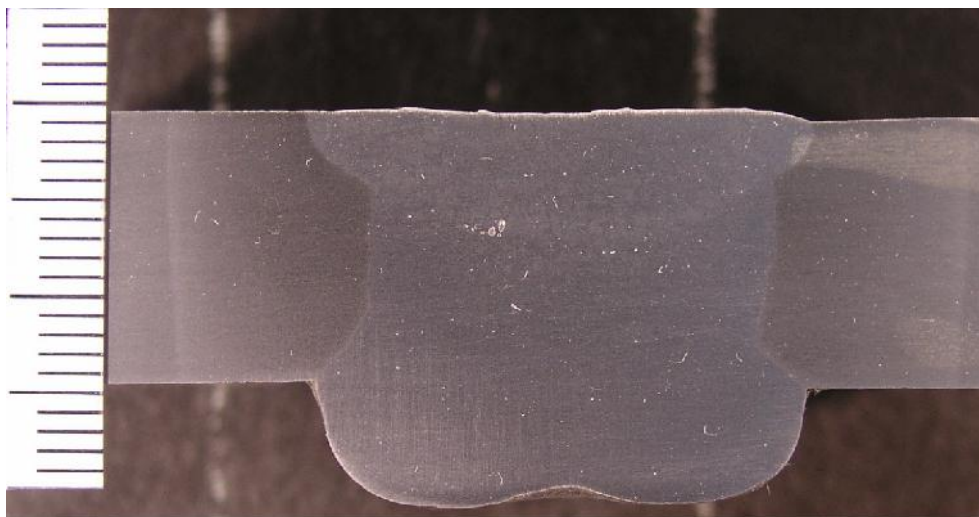
Paralelno je vršena obrada epruveta za statički vlačni pokus. Dimenzije plinski izrezanih segmenata iz vrata tražnice su iznosile  $300 \times 40 \times 12$  mm. Bilo je potrebno glodanje središnjih 100 mm epruvete tako da se širina s 40 mm smanji na 25 mm. No, ni to nije proteklo bez problema. Nakon bezuspješnog pokušaja obrade u poduzeću ZET, glodanje je, prema slici 5.15, izvršeno u Laboratoriju za alatne strojeve. Nakon brušenja nadvišenja zavar, uzorci su bili spremni za ispitivanje.



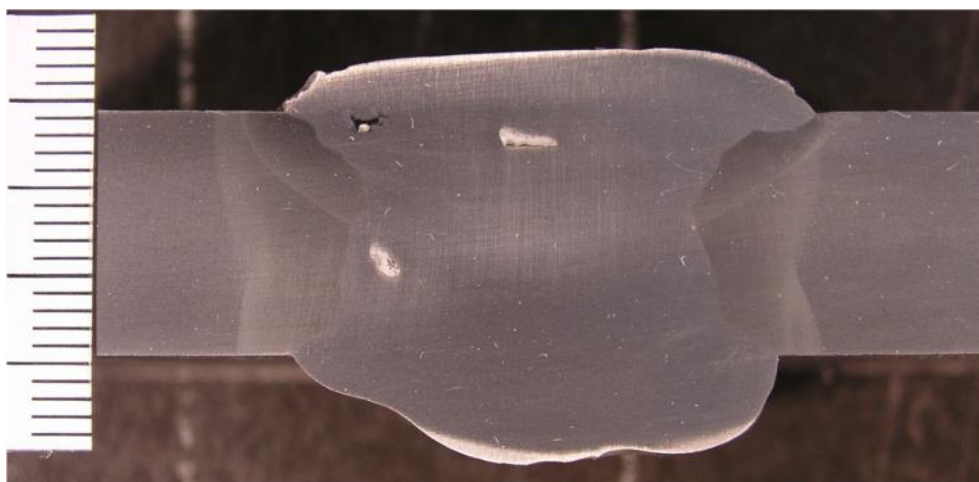
Slika 5.15. Glodanje epruvete za statički vlačni pokus

### 5.3.2. Ispitivanje makrostrukture

Za ispitivanje makrostrukture pripremljeni su makroizbrusci iz nožice i vrata uzoraka 3, 5, 6 i 7 te iz glave tračnice uzoraka 3 i 5. Cilj analize ispitnih površina s uzoraka 3 i 5 je utvrđivanje utjecaja temperature predgrijavanja na veličinu i oblik ZUT-a i na miješanje osnovnog i dodatnog materijala. Prethodna ispitivanja su utvrdila brojne greške u zavarenom spoju uzorka 6, te je on analiziran kao reprezentativni primjer neprihvatljivog zvara. Makroizbruskom nožice tračnice uzorka 7 želi se odrediti utjecaj podložne eline ploče. Na slikama 5.16 do 5.24 su prikazani navedeni makroizbrusci. Ispitna površina na makroizbruscima nožice se nalazi na nožici sa strane vodilice udaljena oko 10 mm od vrata, ispitna površina na vratu je pozicionirana tik uz nožicu, a vanjski dio glave tračnice ini ispitnu površinu na pripadajućem makroizbrusku.



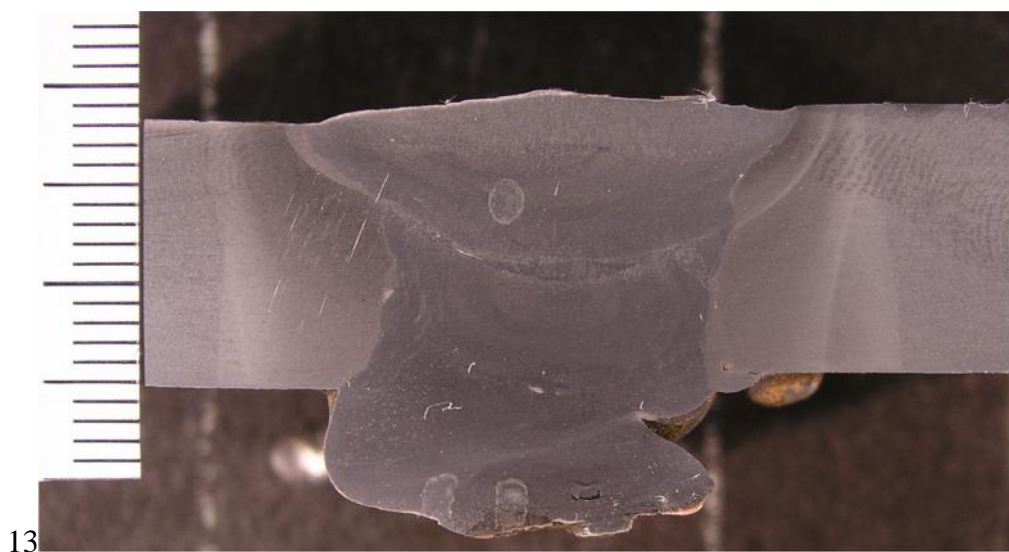
Slika 5.16. Makroizbrusak nožice tračnice uzorka 3



Slika 5.17. Makroizbrusak nožice tračnice uzorka 5

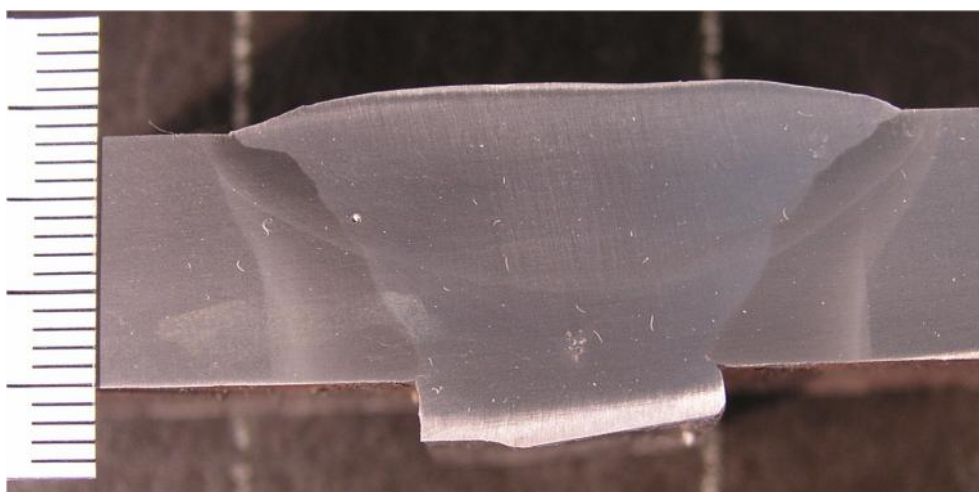
Usporedbom veličine ZUT-a na prethodnim makroizbruscima može se uočiti širi ZUT na uzorku 3 s postepenijom i fluidnijom promjenom mikrostrukture. ZUT uzorka 5 je užiji s oštrijim prijelazom između pojedinih mikrostrukture. Niža temperatura predgrijavanja je uzrokovala nagli pad temperature, pa je užiji ZUT logična i očekivana posljedica. Miješanje osnovnog i dodatnog materijala je dobro u oba slučaja.

Od grešaka, na uzorku 3 se može uočiti nekoliko malih pora, a na uzorku 5 mala šupljina i uključci zaostale troske relativno malih dimenzija.



Slika 5.18. Makroizbrusak nožice tračnice uzorka 6

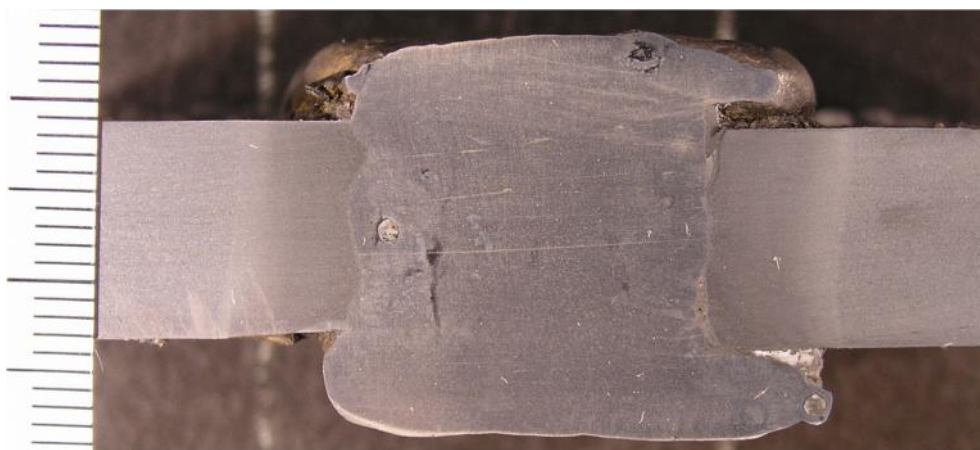
Na makroizbrusku uzorka 6 je vidljivo veliko nadvišenje s donje strane nožice s uključcima bakra s podložne ploče pri dnu. Između slojeva se može uočiti nekoliko vrlo malih uključaka troske.



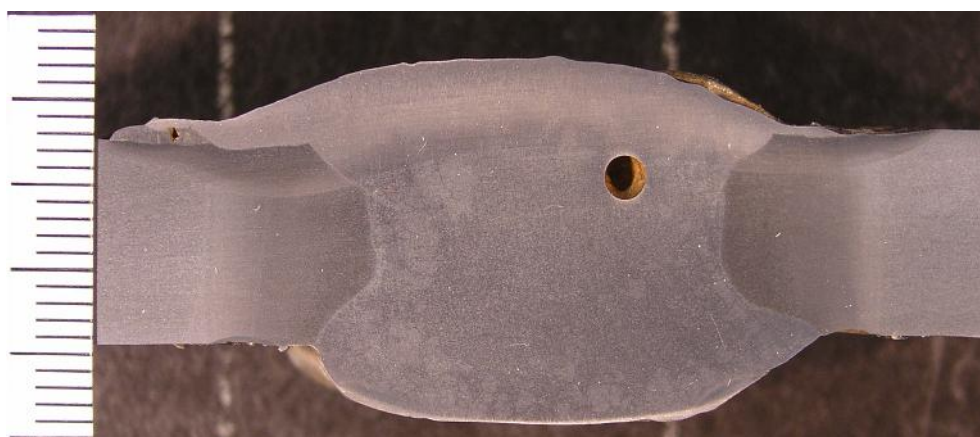
Slika 5.19. Makroizbrusak nožice tračnice uzorka 7



Ovim makroizbruskom je prikazana moguća ušteda dodatnog materijala u slučaju primjene podložne pločice. Naime, nadvišenje ini sama pločica, pa je utrošak žice smanjen za cijeli volumen nadvišenja zavariva s donje strane nožice. Prema približnom izračunu iz površina metala zavariva svih makroizbrusaka nožice, površina nadvišenja s donje strane nožice iznosi prosječno 35 % ukupne površine metala zavariva. Dakle, ako se primijeni podložna pločica, utroši se prosječno 35 % manje žice za zavarivanje nožice tračnice.



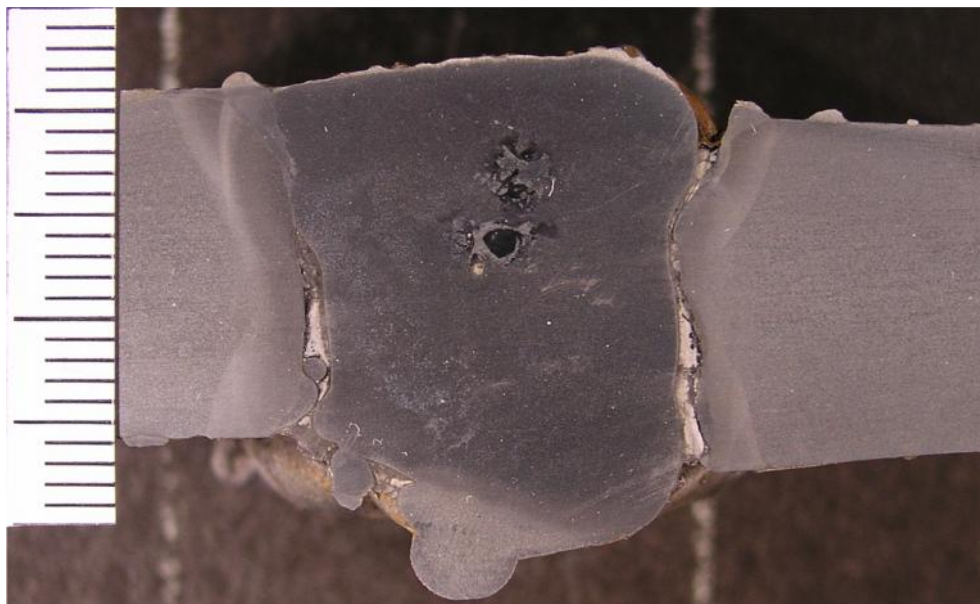
Slika 5.20. Makroizbrusak vrata tračnice uzorka 3



Slika 5.21. Makroizbrusak vrata tračnice uzorka 5

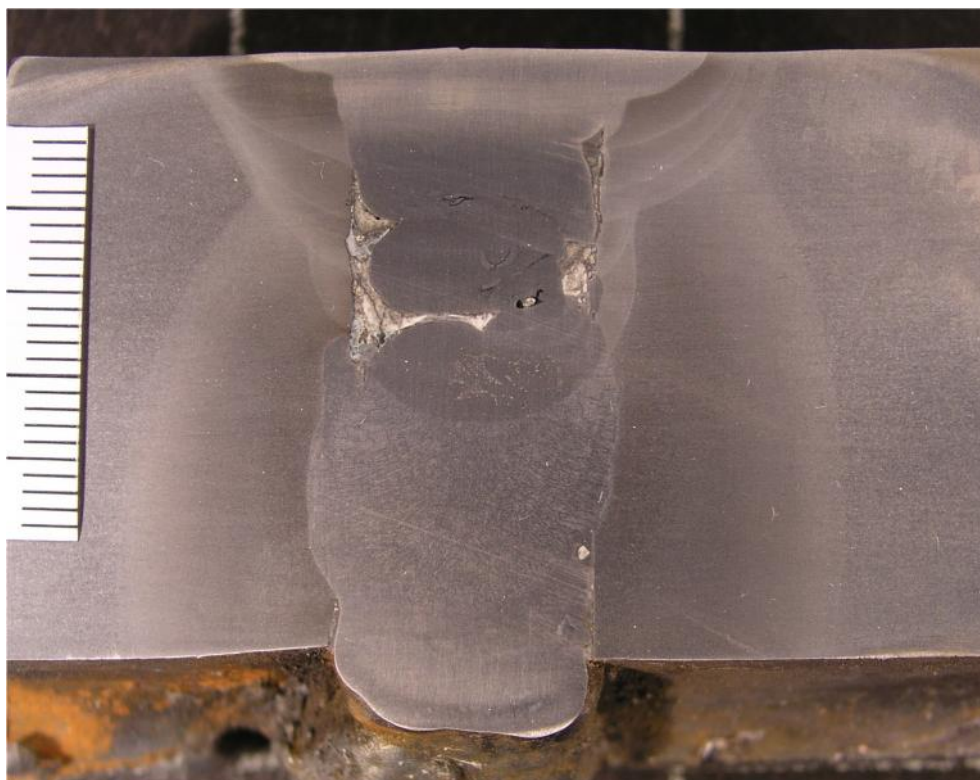
Promatrajući i makroizbruske vrata uzoraka 3 i 5, ne može se utvrditi značajna razlika u veličini ZUT-a, odnosno utjecaj različitih temperatura predgrijavanja. U slučaju uzorka 3 je, unatoč višoj temperaturi predgrijavanja, mjestimično prisutna greška naljepljivanja, no to se pripisuje neprikladnoj tehnici rada.

Među greškama, osim spomenutog naljepljivanja, mogu se uočiti veće količine uključaka troske, te sitne pore i šupljine kod uzorka 3 i relativno velika pora na uzorku 5.

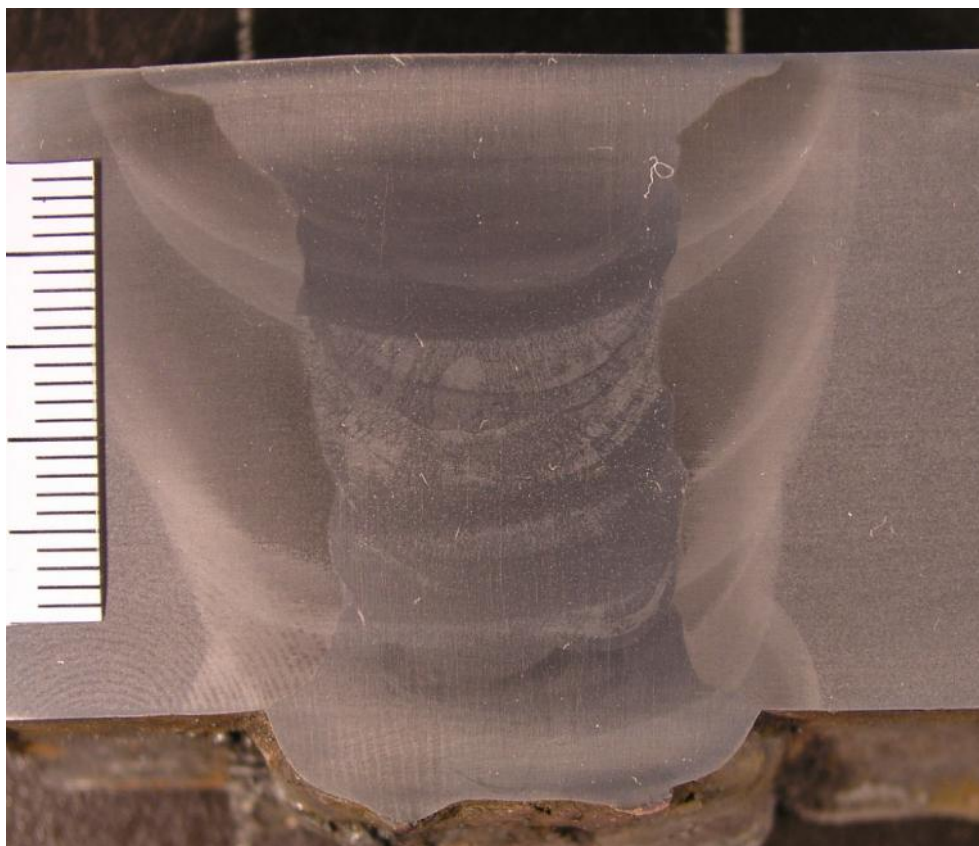


Slika 5.22. Makroizbrusak vrata tra nica uzorka 6

Makroizbrusak vrata uzorka 6 je primjer potpuno neprihvatljive količine uključenih troski. Posebna opasnost leži u tome što je troska raspoređena po rubovima zavarivanja i time opasan diskontinuitet. Drugim riječima, na prikazanoj ispitnoj površini uopće nije ostvaren međusobni spoj dviju tračnica.



Slika 5.23. Makroizbrusak glave tra nica uzorka 3



Slika 5.24. Makroizbrusak glave tra nice uzorka 5

Me u makroizbruscima glava tako er nije mogu e utvrditi razliku u veli ini ZUT-a kao posljedicu varijacije temperature predgrijavanja. No, na ispitnoj površini glave uzorka 3 može se primijetiti kako ve a koli ina zaostale troske može djelovati kao izolator i time smanjiti ZUT. Kod uzorka 5 je postignuto dobro miješanje dodatnog i osnovnog materijala unato slabijem predgrijavanju.

### 5.3.3. Mjerenje tvrdo e

Za mjerenje tvrdo e odabrani su makroizbrusci iz glave, vrata i nožice uzoraka 3 i 5. Na svakom makroizbrusku su provedena po tri mjerenja u svakoj zoni zavarenog spoja. Dakle, u osnovnom materijalu (OM), zoni utjecaja topline (ZUT), liniji staljivanja (LS) s desne strane zavara, u istim zonama s lijeve strane te u metalu zavara (MZ). Ukupno 21 mjerenje na svakom makroizbrusku. Mjerenje je provedeno metodom po Vickersu uz silu od 98,1 N (HV10). Na svjetlosnom mikroskopu, uz pove anje od 200 puta, izmjerene su duljine dijagonala otiska dijamantne etverostrane piramide. Tvrdo a je o itana iz pripremljene tablice prema izra unatoj srednjoj vrijednosti duljina dviju dijagonala. Postupak mjerenja tvrdo e je prikazan na slici 5.25, a dobivene vrijednosti u tablicama 5.17 i 5.18. Maksimalne vrijednosti u pojedinoj zoni su podebljane i ispisane u posebnom retku tablice. Grafi ki prikaz rezultata za pojedine dijelove

tra nice dan je na slikama 5.26, 5.27 i 5.28. Na svakom dijagramu su usporedno prikazane izmjerene vrijednosti za oba ispitana uzorka.



Slika 5.25. Mjerenje tvrdo e



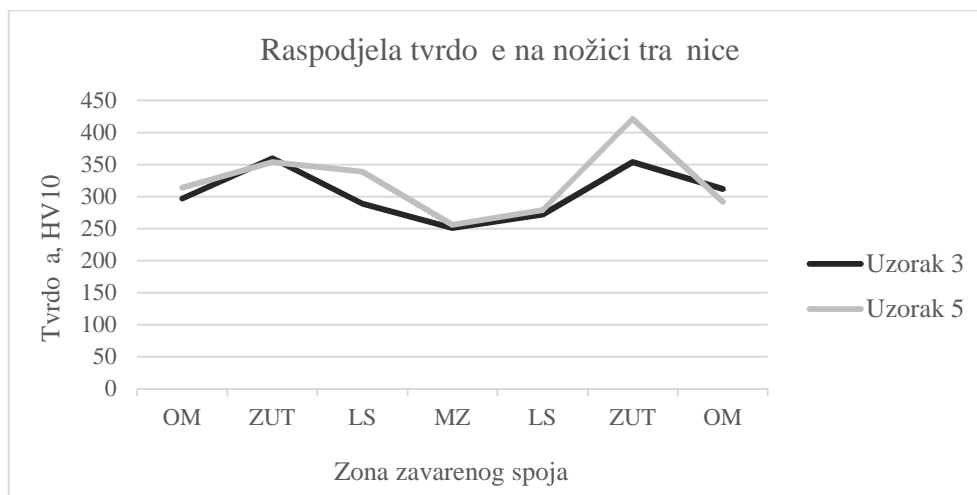
Tablica 5.17. Izmjerene vrijednosti tvrdo e na makroizbruscima uzorka 3

	Nožica							Vrat							Glava						
Zona	OM	ZUT	LS	MZ	LS	ZUT	OM	OM	ZUT	LS	MZ	LS	ZUT	OM	OM	ZUT	LS	MZ	LS	ZUT	OM
Tvrdo a	297	360	276	236	262	354	312	299	327	247	249	312	336	302	306	306	312	274	254	373	299
	294	345	289	251	272	351	297	297	336	292	240	270	330	297	276	366	270	236	270	387	297
	289	348	287	228	256	345	287	289	342	317	249	289	354	299	292	390	289	221	289	302	294
max.	297	360	289	251	272	354	312	299	342	317	249	312	354	302	306	390	312	274	289	387	299
	4,0	7,9	7,0	11,7	8,1	4,6	12,6	5,3	7,5	35,5	5,2	21,0	12,5	2,5	15,0	43,3	21,0	27,3	17,5	45,6	2,5

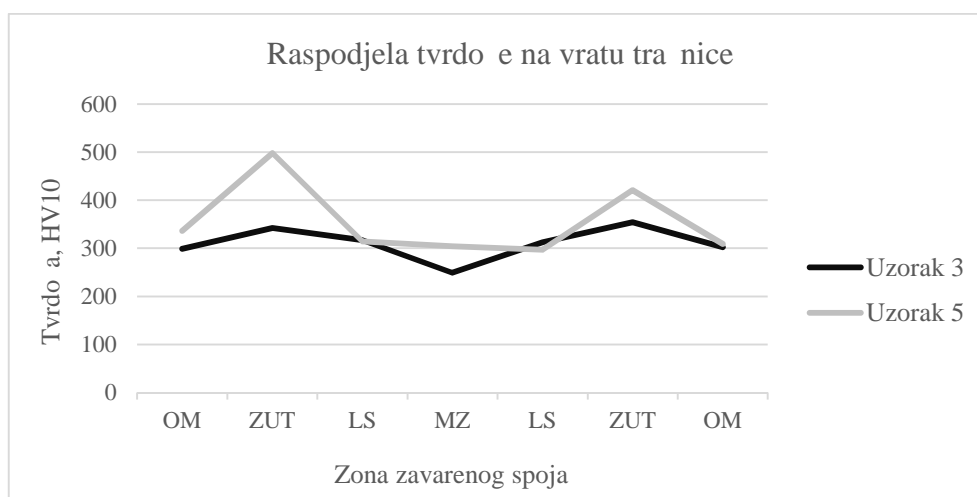
Tablica 5.18. Izmjerene vrijednosti tvrdo e na makroizbruscima uzorka 5

	Nožica							Vrat							Glava						
Zona	OM	ZUT	LS	MZ	LS	ZUT	OM	OM	ZUT	LS	MZ	LS	ZUT	OM	OM	ZUT	LS	MZ	LS	ZUT	OM
Tvrdo a	297	327	294	256	249	421	292	336	498	285	304	270	421	309	289	304	266	233	264	302	297
	306	345	249	230	245	327	289	333	390	249	274	270	360	297	306	357	366	256	266	327	304
	314	354	339	238	279	322	292	312	397	314	266	297	380	292	304	383	272	232	285	390	292
max.	314	354	339	256	279	421	292	336	498	314	304	297	421	309	306	383	366	256	285	390	304
	8,5	13,7	45,0	13,3	18,6	55,8	1,7	13,1	60,4	32,6	20,0	15,6	31,1	8,7	9,3	40,3	56,1	13,6	11,6	45,3	6,0

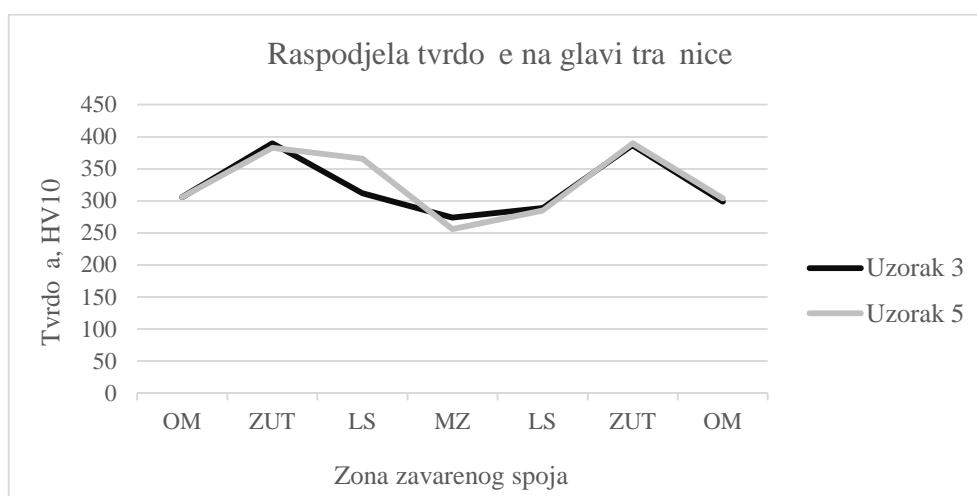




Slika 5.26. Dijagram vrijednosti tvrdo e po zonama zavara nožice tra nice



Slika 5.27. Dijagram vrijednosti tvrdo e po zonama zavara vrata tra nice



Slika 5.28. Dijagram vrijednosti tvrdo e po zonama zavara glave tra nice

Analizom izmjerenih vrijednosti utvrđeno je da su najviše tvrdoće zabilježene u ZUT-u tik do linije staljivanja. Tu je brzina hlađenja bila dovoljno velika da nastupi djelomična transformacija u tvrdi i krhki martenzit. Naime, hlađenje ipak nije bilo dovoljno intenzivno, te niti u jednoj zoni zavarenog spoja nije izmjerena tvrdoća koja bi ukazivala na strukturu stopostotnog martenzita. No, standardno odstupanje koje je u većini slučajeva vrlo veliko ukazuje na postojanje različitih mikrostruktura u ZUT-u. Udaljujući se od linije staljivanja, tvrdoća opada do vrijednosti karakterističnih za osnovni materijal. Zbog velike količine unesene topline i velikog broja prolaza, zone utjecaja topline pojedinih prolaza se međusobno presijecaju tako da je većina područja visoke tvrdoće popuštena.

Vrijednosti tvrdoće na liniji staljivanja također karakterizira značajno standardno odstupanje. Ipak, to nije iznenađujuće jer linija staljivanja spaja dvije zone, zonu metala zavara kao najmekšu i ZUT kao najtvrdiju zonu zavarenog spoja. Rezultati mjerenja će značajno odstupati ako je otisak piramide samo malo zamaknut prema jednoj od susjednih zona.

U zoni metala zavara također dolazi do varijacije tvrdoće, no ipak ne toliko izražene. Kako svaki prolaz unesenom toplinom mijenja strukturu prethodnog, i u ovoj zoni je prisutno više različitih mikrostruktura koje uzrokuju povišeno odstupanje. Izmjerene vrijednosti su uglavnom nešto niže od onih u osnovnom materijalu.

Prema otkivanju, vrijednosti tvrdoće imaju najmanje standardno odstupanje u osnovnom materijalu.

Uspoređujući dva ispitana uzorka uočava se da tvrdoća ZUT-a doseže više vrijednosti kod uzorka 5, posebno u vratu i nožici. To se objašnjava većom brzinom hlađenja uzrokovanom većim intenzitetom odvođenja topline uslijed niže temperature predgrijavanja. Među ostalim zonama, značajna razlika izmeću uzoraka se, iz istih razloga, još može uočiti u zoni metala zavara vrata tračnice. Tvrdoće glave tračnice su praktički identične kod oba uzorka. Naime, zavar glave se posljednji izvodi, pa je tračnica već predgrijana na određenu temperaturu zbog prethodnih zavara. Time utjecaj predgrijavanja plinskim plamenikom postaje zanemariv, te je brzina hlađenja bila podjednaka u oba slučaja što je rezultiralo sličnom mikrostrukturom i tvrdoćama.

#### **5.3.4. Statički vlačni pokusi**

Statičkim vlačnim pokusu su podvrgnute epruvete izrezane iz vrata tračnice uzoraka 3, 4, 5 i 6. Ukupna duljina epruveta je iznosila 350 mm, a središnji ispitni dio je dug 100 mm sa zavarom u sredini. Poprečni presjek na ispitnom dijelu je pravokutnik dimenzija 25 × 12 mm.

Cilj ovog ispitivanja bio je utvrditi vrsto u zavarenog spoja te mjesto loma. Naime, korišteni dodatni materijal je niže vrste od osnovnog, pa se lom epruvete očekuje u zoni metala zavara. Primijenjena tehnologija zavarivanja podrazumijeva prilično velik unos topline. Rezultat toga je grubozrnata mikrostruktura zavara. Svrha ovog ispitivanja je provjeriti je li postignuta vrsta zavara koju garantira proizvođač žice unatoč takvoj mikrostrukturi. U tablici 5.19 je dana usporedba svojstava osnovnog materijala i garantiranih svojstava zavara za korišteni dodatni materijal.

Tablica 5.19. Usporedba svojstava osnovnog i dodatnog materijala [17, 22]

Svojstvo	Osnovni materijal	Dodatni materijal
Vlačna vrsta $R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	680-830	640
Istezanje A, %	14	27

Prije ispitivanja su na epruvetama zacrtane dvije linije unutar mjernog područja. Međusobna udaljenost tih linija je bila 60 mm. Mjerenjem te udaljenosti nakon loma, odredit će se ukupno produljenje. Osim toga, iz poznate površine poprečnog presjeka i maksimalne sile, odredit će se vlačna vrsta i prekidno naprezanje. Ispitivanje je prikazano na slici 5.29.



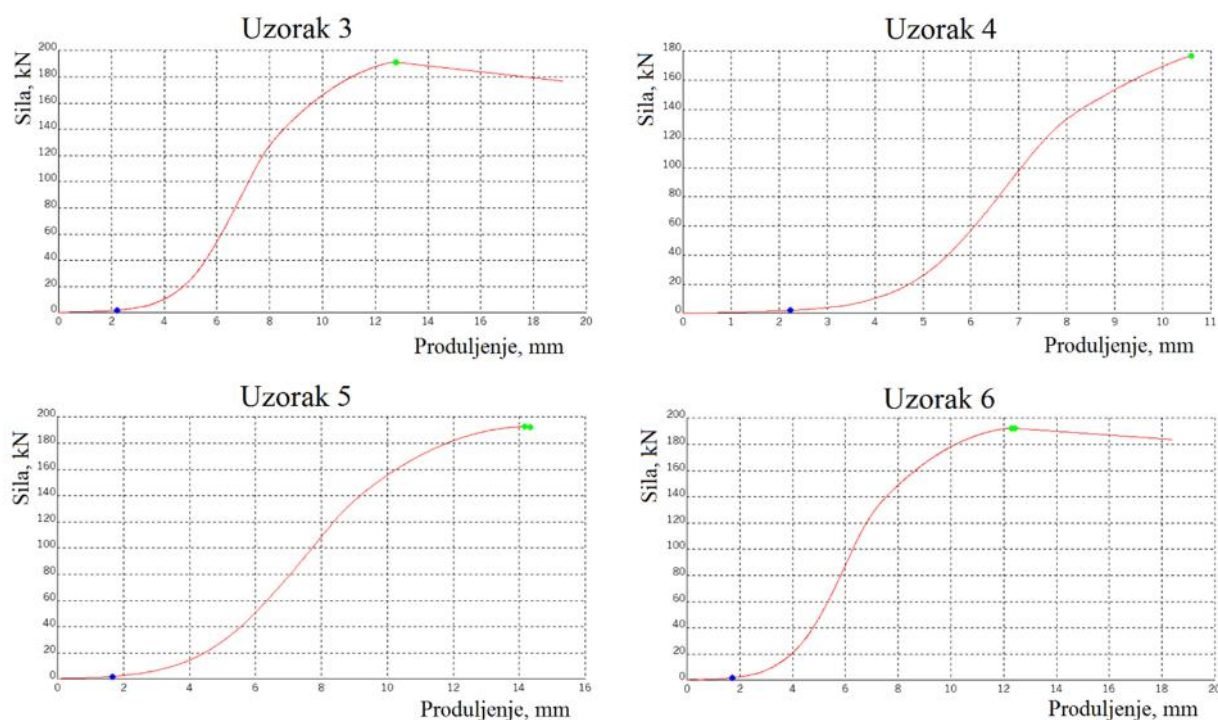
Slika 5.29. Statički vlačni pokus

Dobivene vrijednosti vlačne vrsto e i produljenja za svaki uzorak su dane u tablici 5.20, a pripadaju i dijagrami sila-istezanje na slici 5.30. Prijelomne površine su prikazane na slici 5.31.

Tablica 5.20. Vrijednosti dobivene statičkim vlačnim pokusom

	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	Uzorak 6
Maksimalna sila $F_m$ , kN	192,5	176,8	192,3	191,2
Vlačna vrsto a $R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	641,7	589,3	640,9	637,3
Sila kidanja $F_k$ , kN	192,3	176,8	191,9	191,1
Prekidna vrsto a $R_p$ , N/mm <sup>2</sup>	641,1	589,3	639,7	637,1
Istezljivost, %	6,7	4,2	6,9	6,7

Rezultati su ispunili očekivanja. Kod svih ispitnih epruveta je došlo do loma u metalu zavaru tik do linije staljivanja. Prijelomna površina je karakteristična za krhki lom što se može zaključiti i iz niskih vrijednosti istezljivosti. Dobivene vrijednosti vlačne vrsto e imaju malo odstupanje što znači da varijacije tehnologije zavarivanja nisu značajno utjecale na vrsto u zavaru. Po apsolutnom iznosu, vrijednosti vlačne vrsto a svih uzoraka su na donjoj granici garantiranih vrijednosti osim kod uzorka 4 gdje su svega 10-ak posto niže.



Slika 5.30. Dijagrami sila-produljenje dobiveni statičkim vlačnim pokusom



Uzorak 3



Uzorak 4



Uzorak 5



Uzorak 6

Slika 5.31. Prijelomne površine epruveta pojedinih uzoraka – krhki lom

## 6. ZAKLJUČAK

Kroz brojna nerazorna i razorna ispitivanja utvrđeno je postojanje velikog broja grešaka u zavarenim spojevima, a posebno u donjim dijelovima vrata, glave i vodilice te s donje strane nožice tračnice. Analiziraju i informacije prikupljene tijekom samog zavarivanja uzoraka, sa sigurnošću se može ustvrditi da su gotovo sve greške posljedica neprimjerene tehnike rada. Lošoj tehnici rada je sigurno pridonijela nedovoljna neuvježbanost i neiskustvo zavarivača kada se radi o postupku zavarivanja samozaštitnom praškom punjenom žicom. Tome valja pridodati da su uočene velike razlike između tehnika rada pojedinih zavarivača. Za rješavanje tog problema predlaže se dodatna obuka zavarivača te osiguravanje prilike za kontinuirano vježbanje ove tehnologije ukoliko se ista kroz dulje vrijeme ne primjenjuje u praksi.

Također, uočeno je problem teško predvidivog pomicanja tračnica tijekom zavarivanja uslijed toplinskih dilatacija. Uvjet koji bi osigurao tu predvidivost jest točno poznavanje volumena i geometrije pripreme spoja. To se može postići i uvođenjem tehnologije rezanja tračnica koja bi rezultirala ravnim rezom. Tada bi se, pomoću ispravne mjerne opreme, mogla utvrditi korelacija između, recimo, veličine zazora i nastale deformacije tračnice nakon zavarivanja.

Nedovoljno kruto izvršenje bakrenih obloga omogućuje njihovo pomicanje tijekom zavarivanja. Rezultat toga je povećanje nadvišenja zavara vrata gledaju i od nožice prema glavi, a time i, potpuno nepotreban, povećani utrošak dodatnog materijala i vremena.

Ispitivanjima je utvrđeno da je snižena temperatura predgrijavanja ipak utjecala na promjenu mikrostrukture u zoni utjecaja topline u zavaru vrata i nožice, no ta promjena je toliko neznatna da zasigurno neće ugroziti mehanička svojstva cjelokupnog zavara. Postignuto je dobro miješanje dodatnog i osnovnog materijala unatoč slabijem predgrijavanju.

Zabijanjem klina u zazor između glava tračnice s ciljem održavanja veličine zazora konstantnim, postiže se deformacija tračnice u obrnutom smjeru od predviđenog. Stoga se ne preporučuje primjena klina uz postojanje u tehniku i smjer predeformacije.

Primjenom elin ploče, pri zavarivanju nožice, ostvaruje se ušteda dodatnog materijala i vremena zavarivanja za oko 35 %. Dodatne uštede se mogu ostvariti umetanjem iste ploče u unutrašnjost zazora između tračnica i povećanjem temperature predgrijavanja na oko 300 °C kako bi se osiguralo dobro protaljivanje i miješanje materijala. Pri tome ispod tračnice treba biti postavljena ravna bakrena podloška bez žlijeba. Time bi se postigla ravna površina zavara s donje strane tračnice bez ikakvih koncentratora naprezanja.

## LITERATURA

- [1] Mundrey, J. S.: *Railway Track Engineering*. Tata McGraw-Hill Education Private Limited. New Delhi. 2010.
- [2] Popović, O.; Prokić-Cvetković, Radica.; Jović, R.: *Razvoj tehnika za izradu šina*. IMK-14 Istraživanje i razvoj 41/4. 25-32. 2011.
- [3] autorizirana predavanja: Lakušić, S.: *Željeznice*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb. 2005.
- [4] autorizirana predavanja: Abbas, A.: *Transportation Engineering*. The University of Lahore. Lahore. 2013.
- [5] tekst na mrežnoj stranici: *Travnice*. <http://www.prometna-zona.com/zeljeznicki-infrastruktura-001travnice.php> (pristupljeno 17. travnja 2015.)
- [6] tekst na mrežnoj stranici: *Željeznica*. <http://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDeljeznica> (pristupljeno 11. travnja 2015.).
- [7] slike na mrežnoj stranici: *Tata Steel Products*. <http://www.tatasteellrail.com/en/products-and-services/products> (pristupljeno 18. travnja 2015.)
- [8] ....., EN 14811:2006
- [9] Zlatnik, A.: *Welding recommendation for Vignol and Grooved rails*, Voestalpine Schienen GmbH. Leoben. 2012.
- [10] Vitez, I; Hojzan, T.: *Usporedba normi o svojstvima tehnika za željezničke travnice*. Građevinar 55/5. 279-284. 2003.
- [11] Kapoor, A. i dr.: *Modern Tribology Handbook – Tribology of Rail Transport*. CRC Press. Boca Raton. 2001.
- [12] Olofsson, U. i dr.: *Tribology of the wheel – rail contact – aspects of wear, particle emission and adhesion*. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility 51/7. 1091-1120. 2013.
- [13] autorizirana predavanja: Lakušić, S.: *Gornji ustroj željeznica*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb. 2006.



- [14] ....., *Welding Recommendations for Rail Steels*. TSTD Schienen Technik GmbH. Duisburg.
- [15] ....., *Innershield Welding Guide*. Lincoln Electric. Cleveland. 2011.
- [16] tekst na mrežnoj stranici: Samardži , I. i dr. *Analiza tehnologi nosti zavarenih konstrukcija*. SFSB. <http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/sadrzaj.html> (pristupljeno 22. 4. 2015.)
- [17] diplomski rad: Džambas, T.: *Mehani ka svojstva zavara tra nica izvedenih elektrolu nim postupcima zavarivanja*. Gra evinski fakultet Sveu ilišta u Zagrebu. Zagreb. 2012.
- [18] tekst na mrežnoj stranici: *Javni gradski prijevoz – jedan od aduta kojim Zagreb opravdava status metropole*. <http://www.zet.hr/default.aspx?id=9> (pristupljeno 2. srpnja 2015.).
- [19] Lakuši , S; Ahac, M.: *Raspodjela tvrdo e u popre nom presjeku žljebaste tra nice*. Gra evinar 64/12. 1009-1018. 2012.
- [20] Garaši , I.: *Analiza zavarivanja tra nica kvalitete R200 i preporuke za poboljšanje tehnologije*. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb. 2013.
- [21] tekst na mrežnoj stranici: *Engine Driven Welders*. <http://www.lincolnelectric.com/en-gb/equipment/engine-drives/Pages/engine-drives.aspx> (pristupljeno 2. srpnja 2015.).
- [22] tekst na mrežnoj stranici: *Innershield NS 3ME* [http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable\\_Flux-CoredWires-Self-Shielded-Innershield-InnershieldNS-3M/Ns3me-eng.pdf](http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_Flux-CoredWires-Self-Shielded-Innershield-InnershieldNS-3M/Ns3me-eng.pdf) (pristupljeno 2. srpnja 2015.).